

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática
2016-2017

Trabajo Fin de Grado

“Diseño de convertidor cc-cc para una aplicación móvil alimentada a partir de una pila de combustible de 50W”

Juan Carlos Ortega Martínez

Tutora

Cristina Fernández Herrero

Leganés, Madrid. 16/10/2017



[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

RESUMEN

Este proyecto se basa en el diseño y fabricación de un convertidor cc-cc con aislamiento galvánico, en este caso, se trata de un convertidor Forward. El objetivo principal de este proyecto es limitar el tamaño de la placa con respecto al convertidor original sobre el que se va a trabajar.

Se parte de un diseño anterior en el que se usaron 2 pilas de 25W para alimentar el convertidor, mientras que, en este nuevo diseño, se va a alimentar con una sola pila, pero de 50W. El convertidor original del que se parte, tiene las siguientes especificaciones:

Condiciones iniciales	
Ve (Tensión de entrada)	33,6 V
Vo (Tensión de salida)	14,4 V
Po (Potencia de salida)	50W
Frecuencia	300KHz
Rizado de la tensión de salida	1%

Tabla A: Especificaciones del Forward original

Como se ha comentado antes, el diseño, la fabricación y su posterior construcción, se tiene que llevar a cabo bajo estas especificaciones. Por lo tanto, habrá que comprobar de qué manera se puede reducir el tamaño de la placa PCB.

Para conseguirlo, se van a usar diferentes herramientas informáticas como son los programas de electrónica, aunque primeramente se debe analizar el circuito de manera teórica.

Como ya se ha dicho anteriormente, los programas a usar en este proyecto son:

- "PSIM", con el que se van a realizar simulaciones del circuito para ver cómo se comporta en las condiciones previamente establecidas.
- "OrCad Capture CIS", también es un programa de simulación pero que en este caso se va a usar como programa "puente" para el "OrCad Layout"

- “OrCard Layout”, es el programa con el que se va a diseñar la placa PCB y se va a estudiar cuál es la mejor disposición de los componentes.

Para este proyecto, hay que tener en cuenta que, para tener una placa más pequeña, hay que buscar unos componentes más pequeños, y el objetivo de este proyecto es intentar ganar este espacio con los componentes más grandes, así sean, el transformador y la bobina.

Índice

RESUMEN	2
1. Motivación	9
2. Objetivos y metodología	10
3. Pilas de combustible.....	11
3.1. Que son y cuál es su funcionamiento	11
3.2. Ventajas frente a las pilas convencionales	12
4. Estado actual de la tecnología	13
4.1. Convertidores sin aislamiento	14
4.1.1. Convertidor reductor	14
4.1.2. Convertidor elevador	17
4.1.3. Convertidor elevador-reductor.....	19
4.2. Convertidores con aislamiento galvánico	21
4.2.1. Convertidor Flyback	21
4.2.2. Convertidor Forward	21
5. Elección de la topología.....	23
6. Nuevo diseño con una sola pila de combustible	24
7. Funcionamiento del convertidor Foward	25
7.1. Convertidor Forward	25
7.2. Diseño del convertidor	29
7.3. Diseño de los componentes	32
7.3.1. Transistores	32
7.3.2. Diodo	33
7.3.3. Condensador	35
7.3.4. Bobina	35
7.3.5. Transformador.....	36
7.3.6. Resistencia de carga	40
7.4. Cálculos teóricos.....	40
8. Modelado del convertidor o resultados de simulación	43
8.1. Simulación del circuito en condiciones normales	43
8.2. Simulación del sistema con $r_t = 1$	46
8.3. Simulación del sistema con $r_t = 2$	48
8.4. Comparación de las simulaciones al cambiar la r_t	50
9. Comparación de la huella del convertidor.....	52
10. Conclusiones y trabajos futuros	58

11.	Bibliografía	59
12.	Anexos.....	60
12.1.	Anexo I: Presupuesto	60

Índice de figuras

Tabla A: Especificaciones del Forward original.....	2
Figura 1: Ejemplo convertidor cc-cc	9
Figura 2: Partes de pila y funcionamiento	11
Figura 3: Esquema convertidor conmutado.	13
Figura 4: Esquema convertidor lineal	13
Figura 5: Esquema convertidor reductor y sus etapas de funcionamiento	15
Figura 6: Formas de onda de la bobina y del sistema en MCC (Reductor)	15
Figura 7: Formas de onda de la bobina y del sistema en MCD (Reductor)	17
Figura 8: Esquema convertidor elevador y sus etapas de funcionamiento	18
Figura 9: Formas de onda de la bobina y del sistema en MCC (Elevador)	18
Figura 10: Formas de onda de la bobina y del sistema en MCD (Elevador).....	19
Figura 11: Esquema convertidor elevador-reductor	19
Figura 12: Formas de onda de la bobina en MCC (Elevador-Reductor)	20
Figura 13: Formas de onda de la bobina en MCD (Elevador-Reductor).....	20
Figura 14: Esquema convertidor Flyback.....	21
Figura 15: Esquema del convertidor Forward	22
Figura 16: Formas de onda convertidor Forward	22
Figura 17: Esquema circuito Forward	25
Figura 18: Esquema Forward período <i>ton</i>	26
Figura 19: Esquema Forward período <i>toff</i>	27
Figura 20: Formas de onda de los principales componentes del circuito Forward	29
Figura 21: Esquema convertidor	29
Figura 22: Low side.....	30
Figura 24: Mosfet IRF6216	33
Figura 26: Diodo 50WQ06FN.....	34
Figura 27: Condensador de 560uF y de 32uF	35
Figura 28: Bobina PCV-2-104-05L.....	36
Figura 29: En el flujo en el primer cuadrante	37
Figura 31: Profundidad pelicular	38
Figura 32: Diseño final del transformador.....	40
Figura 33: Esquema del circuito en el programa de simulación en condiciones normales.....	43
Figura 34: Formas de onda del convertidor en condiciones normales	45
Figura 35: Esquema del convertidor con $r_t = 1$	46
Figura 36: Formas de onda para una $r_t = 1$	48

Figura 37: Esquema del convertidor para una $rt = 2$	48
Figura 38: Formas de onda para una $rt = 2$	50
Figura 39: Esquema del convertidor en el programa “OrCad Capture CIS”	52
Figura 40: Huella del convertidor original	54
Figura 41: Huella del convertidor en el programa OrCad Layout	55
Figura 42: Placa PCB construida sin taladrar y sin componentes (capa BOT)	56
.....	56
Figura 43: Placa PCB taladrada (capa TOP).....	56
Figura 44: Montaje final convertidor (cara TOP)	57
Figura 45: Montaje final convertidor (cara BOT)	57

Índice de tablas

Tabla 1: Comparativa MOSFET	32
Tabla 2: Valores característicos de los transistores mosfet.....	33
Tabla 3: Tabla comparativa Diodo.....	34
Tabla 4: Valores característicos para los diodos del circuito	34
Tabla 5: Tabla comparativa Bobina	35
<i>Tabla 6: Valores característicos para la bobina</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 7: Valores de transformador para material 3F3</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 8: Valores de transformador para material 3E5</i>	<i>39</i>
Tabla 9: Valores medios en condiciones normales.....	43
Tabla 10: Valores medios de entrada en condiciones normales	45
Tabla 11: Valores medios para una $r_t = 1$	46
Tabla 12: Valores medios para una $r_t = 2$	49
Tabla 13: Comparación de valores medios para distintas r_t	50
<i>Tabla 14: BOM de nuestro convertidor</i>	<i>53</i>
Tabla 15: Presupuesto	60
Tabla 16: Coste material.....	61
Tabla 17: Coste Personal	61
Tabla 18: Coste total	61

1. Motivación

Hoy en día, los convertidores CC-CC están presentes en todos los ámbitos de la vida, ya que se encuentran en los elementos más simples que se usan en el día a día, como pueden ser los cargadores de los móviles o de los ordenadores.

Estos tipos de circuitos sirven para adecuar la tensión que nos viene de la red (220-230 en España) a otros aparatos, que funcionan por ejemplo a 5V, 10V o 20V.

Estos dispositivos son tan importantes que se han estandarizado, de esta manera todos funcionan de igual manera, solo que están adaptados a las necesidades de cada dispositivo.

Tanta es la necesidad de estos convertidores que, debido a la gran cantidad de consumo energético de todos ellos, no se para de investigar para mejorar la eficiencia de los mismos y para reducir sus tamaños al máximo, lo cual supone un gran reto.

Este proyecto se va a basar en realizar un convertidor CC-CC para una aplicación móvil a partir de una pila de combustible de 50W. Para poder realizar este diseño, debemos de adaptar nuestras necesidades a lo que podemos encontrar en el mercado y para ello, lo primero es elegir un CC-CC acorde a lo que queremos obtener con él.

Para un correcto diseño, se debe cumplir con el reglamento Electrotécnico de baja Tensión, el cual dice “El empleo de autotransformadores no será admitido si los dos circuitos conectados a ellos no tienen un aislamiento previsto para la tensión mayor” [2].

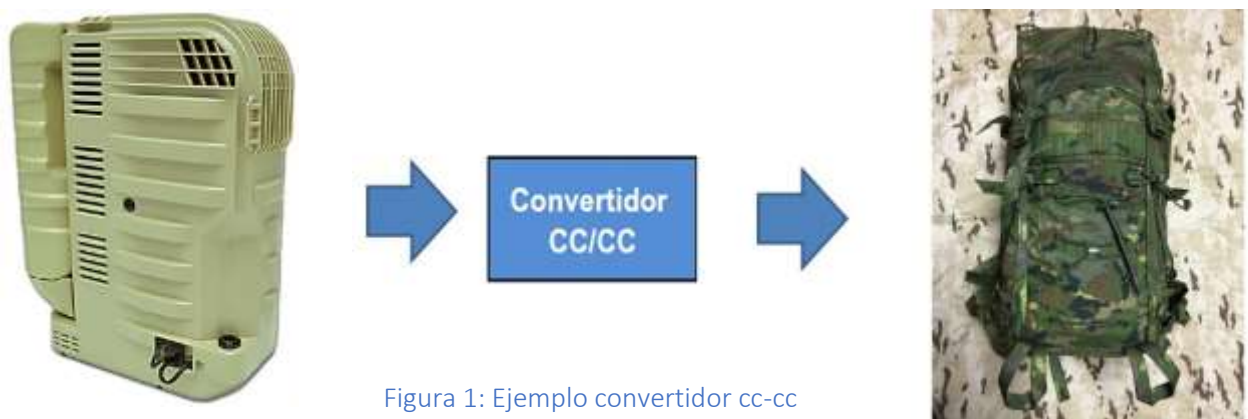


Figura 1: Ejemplo convertidor cc-cc

2. Objetivos y metodología

En este trabajo se va a abordar el diseño un convertidor CC-CC para una aplicación móvil a partir de una pila de combustible de 50W.

Como ya se ha comentado antes, el principal objetivo es realizar un diseño más pequeño que el que se realizó en su momento. Lo ideal sería que además de más pequeño, también fuera más eficiente y que disipara menos energía, entre otros objetivos.

Por lo tanto, el objetivo será el de diseñar un nuevo convertidor con las especificaciones impuestas, y compararlo con el diseño antiguo para así poder ver si existen componentes más eficientes y con mejores prestaciones, con ello se esperar poder cumplir con el objetivo principal, que es, como ya se ha mencionado anteriormente, el de diseñar un convertidor más pequeño y más eficiente.

En lo que a la metodología se refiere, los “pasos” que se van a seguir son los siguientes:

- ✦ Simulación del circuito para ver el correcto diseño del mismo.
- ✦ Diseño del transformador a usar y que cumpla las necesidades.
- ✦ Mediciones en las simulaciones del circuito.
- ✦ Selección apropiada de los componentes para el circuito que cumplan las especificaciones requeridas.
- ✦ Diseño de la placa PCB y su posterior fabricación.
- ✦ Pruebas reales con la placa ya fabricada.

3. Pilas de combustible

3.1. Que son y cuál es su funcionamiento

Las pilas o baterías son unos elementos muy usados gracias a su fácil uso y sobre todo gracias a la gran cantidad de energía que se almacena en ellas, por lo que las convierte en unos componentes muy eficientes, ya que, con un tamaño reducido puede funcionar como una fuente de tensión aportando un gran voltaje. Se trata de unos dispositivos portátiles que son capaces de generar y almacenar energía.

El funcionamiento de estas pilas es muy sencillo puesto que constan de 3 partes: cátodo (positivo), ánodo (negativo) y el electrolito que es la parte conductora. Al cerrar el circuito, los electrones pasan del ánodo al cátodo generando una tensión al atravesar el electrolito. (Figura 1).

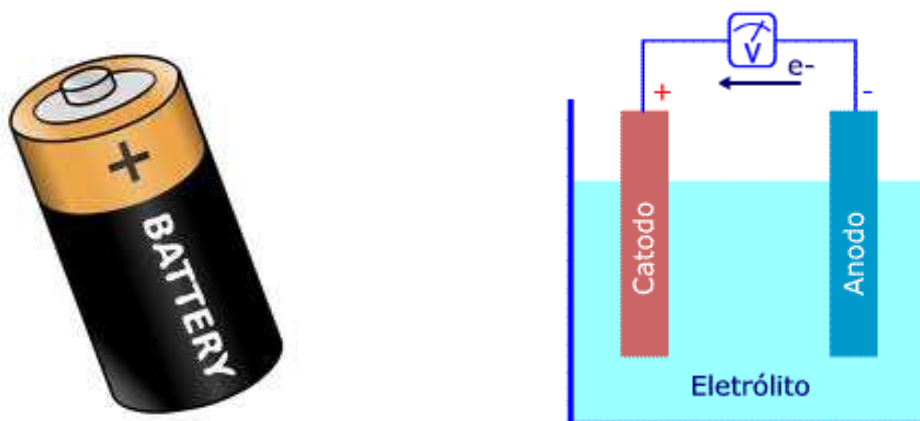


Figura 2: Partes de pila y funcionamiento

Las pilas de combustible actúan de forma similar con la diferencia de que el suministro de voltaje es constante mientras se le suministre el combustible determinado, que normalmente es el hidrógeno. Este es uno de los elementos más comunes ya que se encuentra en el agua.

En este caso, para que se produzca la reacción química, se debe introducir el hidrógeno, a modo de combustible, por el ánodo, mientras que por el cátodo entrará el aire. De esta forma, cuando se cierra el circuito, los electrones del hidrógeno se trasladan al cátodo, como ya hemos explicado anteriormente, generando o bien electricidad o bien calor.

Según la teoría, al producirse la reacción química entre el hidrógeno y el oxígeno, el resultante debería ser solo agua, por lo que el proceso debería ser “limpio”. Pero esto no es del todo cierto porque el hidrógeno es muy difícil de mantener y en la reacción se generan ciertas impurezas que hacen que el proceso no sea cien por cien limpio.

Una de las opciones que se han estado investigando ha sido el almacenar el hidrógeno en forma de metanol, de esta manera, es mucho más sencillo el manejo, lo que lo convierte en una muy buena opción para las pilas de combustible [4] [5].

3.2. Ventajas frente a las pilas convencionales

Los intereses principales del uso de las pilas de combustible frente a las pilas normales, son entre otros, su mayor eficiencia, cerca de un 60% (incluso a altas temperaturas). Son mucho más limpias ya que el único residuo resultante es el agua, aunque con alguna impureza.

Una sola pila de combustible puede funcionar durante toda la vida mientras se le suministre el combustible necesario. No emite ruido alguno y su tamaño se adapta a las necesidades, desde la batería de un móvil hasta la de un coche.

Estas pilas, pueden llegar a convertir más del 90% de la energía contenida en el combustible, mientras que hace unas décadas (1996) tan solo eran capaces de utilizar un 46%.

A pesar de que ya es una tecnología en auge, lo más interesante es que todo esto es algo muy “nuevo” por lo que el campo de desarrollo, es decir, el margen de mejora de estos dispositivos es muy grande y con investigación, se puede llegar a mejorar mucho las especificaciones de estos aparatos. [6] [7]

4. Estado actual de la tecnología

Un convertidor es un dispositivo electrónico que “convierte” la corriente eléctrica de un nivel de tensión a otro. Esto nos sirve para obtener una tensión y una corriente, distinta a la de la entrada.

Tenemos dos tipos de convertidores: lineales y conmutados [1].

- Conmutados: el funcionamiento básico de un convertidor conmutado es el de almacenar energía de manera constante y después liberar dicha energía con un nivel de tensión y corriente distinto al de la entrada, como ya hemos comentado anteriormente.

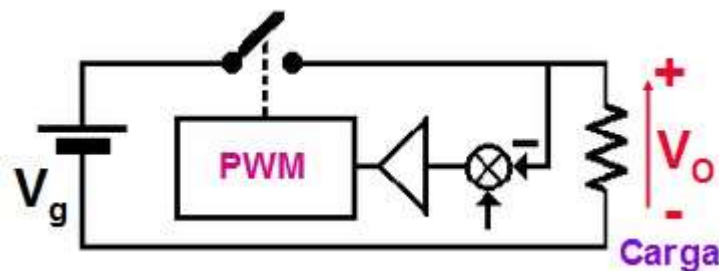


Figura 3: Esquema convertidor conmutado.

- Lineales: un convertidor lineal actúa de la misma manera que uno conmutado solo que cuando libera la energía, tiene que ser con un nivel de tensión menor que el de la entrada, en ningún caso puede ser mayor.

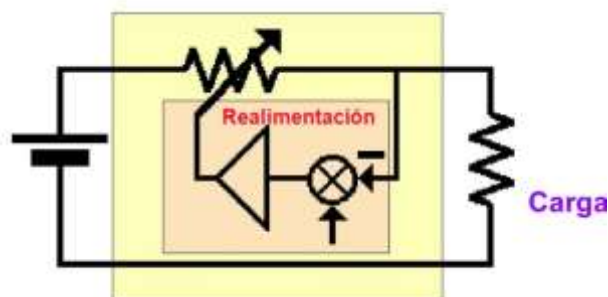


Figura 4: Esquema convertidor lineal

Las principales diferencias entre un tipo de convertidor y otro son que los conmutados tienen una eficiencia mucho mayor, que pueden obtener una tensión

de salida tanto mayor como menor a la de entrada. Otra característica es que en los lineales, la frecuencia de conmutación es mucho menor, por lo que los componentes serán más grandes que en los conmutados. [3]

Una vez descritos los posibles tipos de convertidores que existen, hay que recalcar que este proyecto se va a centrar en los convertidores conmutados por todas las ventajas que tienen frente a los lineales. A su vez, estos convertidores tienen dos subtipos: con aislamiento galvánico o sin aislamiento galvánico.

La función de este aislamiento galvánico se trata de eso mismo, de “aislar” varias partes de un circuito cuando se quiere hacer circular una señal por ellas mismas. Este aislamiento se puede realizar de distintas formas, mediante optoacopladores, relés, transformadores...

En este caso, se utilizará este último dispositivo para realizar el aislamiento galvánico. El funcionamiento de un transformador se basa en lo siguiente, “separar” las dos partes del circuito, de esta manera, se consigue que una de las partes del dispositivo no esté conectada directamente a la red, y así si se produjera algún fallo o sobretensión en la parte que está conectada a la red, la segunda parte no sufriría ningún daño, gracias al transformador.

4.1. Convertidores sin aislamiento

En este apartado se van a explicar las distintas tipologías de convertidores sin aislamiento galvánico [3].

4.1.1. Convertidor reductor

Este tipo de convertidor, como su propio nombre indica, se encarga de reducir la tensión de salida frente a la de entrada. Su funcionamiento es bastante simple, ya que la dirección por la que conduce la corriente depende del elemento que conduzca en cada tramo. Estos elementos son, el transistor MOSFET y el diodo.

El transistor conduce durante el período llamado t_{on} , tiempo de funcionamiento que se explicará más adelante, mientras que el diodo conduce durante el período llamado t_{off} , que también se explicará más adelante (Figura 2).

El objetivo de estos convertidores es saber cuál es la tensión y la corriente que conduce por la bobina en cada caso.

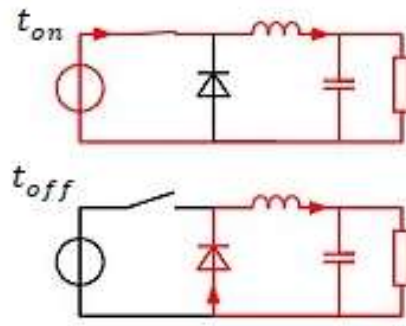


Figura 5: Esquema convertidor reductor y sus etapas de funcionamiento

Estos convertidores pueden funcionar en dos modos: MCC (Modo de Conducción Continua) o MCD (Modo de Conducción Discontinua). Dependiendo de en qué modo de conducción se encuentre, hay que tener en consideración unas cosas u otras.

- En MCC, la tensión de la bobina siempre es mayor que cero, por lo que durante el t_{on} , la bobina se cargará y durante el t_{off} se descarga, esto se observa muy bien si se ven las formas de onda de la tensión y de la corriente de la bobina (Figura 3).

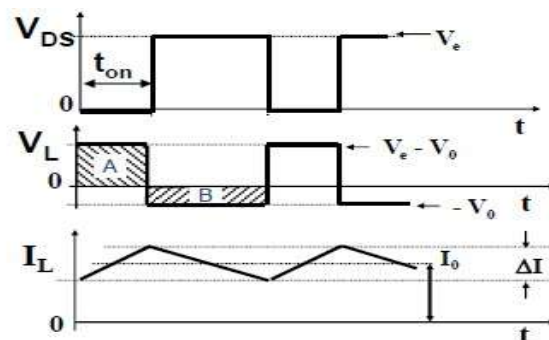


Figura 6: Formas de onda de la bobina y del sistema en MCC (Reductor)

Aquí se muestra claramente como durante el t_{on} la bobina se va cargando, mientras que durante el t_{off} se va descargando, y como es un proceso cíclico, siempre termina donde empieza.

Para averiguar cuál es la ecuación que rige el sistema, se parte de la bobina.

La ecuación característica de la bobina es:

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (1)$$

Si se quiere saber cuánto vale la intensidad que la recorre en cada caso, hay que separar la ecuación entre los dos tramos:

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{t_{on}} di_L = \frac{(V_i - V_o)t_{on}}{L} \quad (2)$$

$$\Delta I_{Loff} = \int_{t_{on}}^T di_L = -\frac{V_o \cdot t_{off}}{L} \quad (3)$$

Como ya se ha visto en la gráfica, la diferencia de corriente es la misma en un tramo que en otro, así que (2) = (3):

$$\frac{(V_i - V_o)t_{on}}{L} = \frac{V_o \cdot t_{off}}{L} \quad (4)$$

Si se despeja la tensión de la salida en función de la de entrada, queda la ecuación característica de los convertidores reductores:

$$V_o = D \cdot V_i \quad (5)$$

- En MCD, existe un tercer tramo de conducción donde la corriente que circula por la bobina es cero, a este período de tiempo se le denomina tiempo muerto, que es tiempo en el cual no conduce ni el transistor ni el diodo. Y las formas de onda de la bobina serían las siguientes:

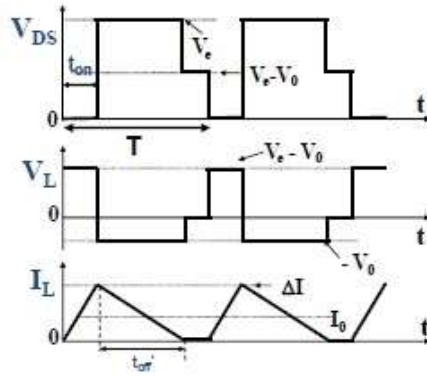


Figura 7: Formas de onda de la bobina y del sistema en MCD (Reductor)

Para calcular la ecuación que rige ahora el sistema, se realizará ahora el mismo proceso, con la única diferencia que ahora el t_{off} también englobará ese tiempo muerto (t_{off}').

$$(V_i - V_o)t_{on} = V_o \cdot D' \cdot T \quad (6)$$

4.1.2. Convertidor elevador

En este caso, el convertidor elevador, realiza la acción opuesta al convertidor descrito más arriba, es decir, este convertidor se encarga de elevar la tensión de salida frente a la de entrada. Al igual que el convertidor reductor, el funcionamiento viene marcado por la conducción o bien del transistor o bien del diodo.

La principal diferencia entre estos dos convertidores, es la colocación de los componentes, debido a esto, las fórmulas no serán las mismas, como se comprobará más adelante.

Pero como ya se ha dicho, el funcionamiento es básicamente el mismo, es decir, el transistor conduce durante la etapa t_{on} y el diodo durante la etapa t_{off} (Figura 4).

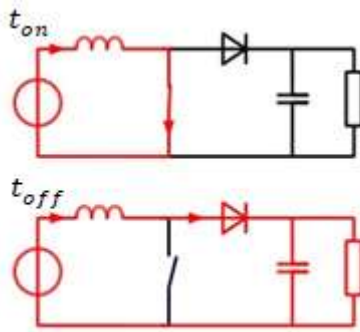


Figura 8: Esquema convertidor elevador y sus etapas de funcionamiento

Al igual que en el convertidor reductor, en este caso también se tiene dos modos de conducción.

- En MCC, se aplica el mismo criterio que en el reductor, solo que ahora hay que tener en cuenta la posición de los componentes, estas son las formas de onda en este caso de la bobina:

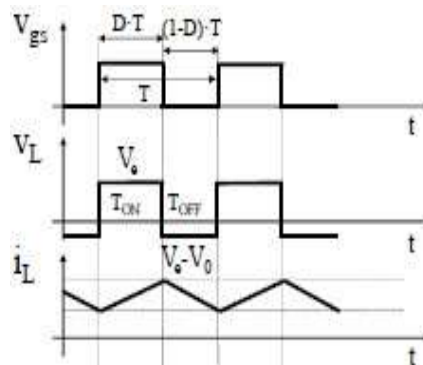


Figura 9: Formas de onda de la bobina y del sistema en MCC (Elevador)

Utilizando de nuevo de la ecuación de la bobina, se obtiene para cada tramo que:

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{t_{on}} di_L = \frac{V_i DT}{L} \quad (7)$$

$$\Delta I_{Loff} = \int_{t_{on}}^T di_L = \frac{(V_i - V_o) \cdot (1-D)T}{L} \quad (8)$$

Aplicando el mismo criterio sobre las diferencias de corriente, se obtiene:

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_i \quad (9)$$

- En MCD, las gráficas quedarían de la siguiente manera:

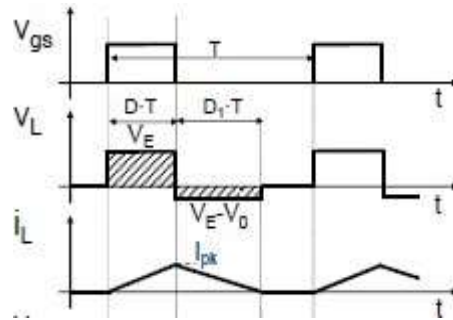


Figura 10: Formas de onda de la bobina y del sistema en MCD (Elevador)

En este caso, al aplicar como siempre, el mismo criterio en MCD que en el reductor:

$$V_o = \frac{V_i(D+D')}{D'} \quad (10)$$

4.1.3. Convertidor elevador-reductor

Un convertidor elevador-reductor, tiene la ventaja, tanto de elevar como de reducir la tensión de salida frente a la de entrada, por lo tanto, es de lógica pensar que su diseño será una “combinación” entre los dos anteriores (Figura 7):

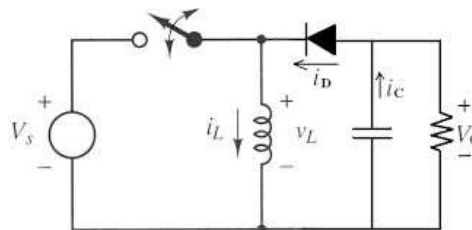


Figura 11: Esquema convertidor elevador-reductor

- En MCC, las gráficas de la bobina son las siguientes:

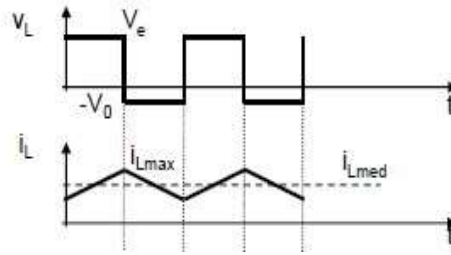


Figura 12: Formas de onda de la bobina en MCC (Elevador-Reductor)

Al igual que en todos los convertidores anteriores, se aplica la condición de $\Delta I = 0$:

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{t_{on}} di_L = \frac{V_i D T}{L} \quad (11)$$

$$\Delta I_{Loft} = \int_{t_{on}}^T di_L = \frac{V_o \cdot (1-D) T}{L} \quad (12)$$

Igualando las ecuaciones anteriores, se obtiene la ecuación final del sistema:

$$V_o = -\left(\frac{D}{1-D}\right)V_i \quad (13)$$

- En MCD, las gráficas son las siguientes:

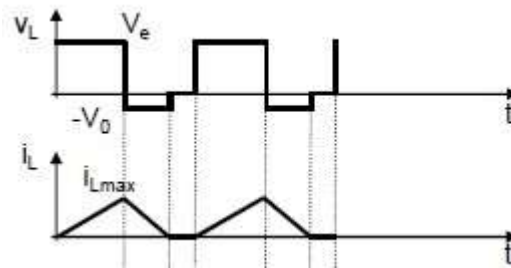


Figura 13: Formas de onda de la bobina en MCD (Elevador-Reductor)

En este caso, para obtener la ecuación final del sistema, no se realiza como hasta ahora, sino con el balance de potencias:

$$P_i = P_o \quad (14)$$

$$\frac{V_o^2}{R_o} = V_e^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{T_{on}^2}{TL} \quad (15)$$

$$V_o = V_i \sqrt{\frac{2L}{R_o T}} \quad (16)$$

4.2. Convertidores con aislamiento galvánico

En este apartado, se van a explicar brevemente los convertidores que tienen aislamiento galvánico.

4.2.1. Convertidor Flyback

Este convertidor, se asemeja al elevador-reductor, con la diferencia que este lleva incorporado el transformador a modo de aislamiento galvánico. La función de este convertidor es la de almacenar energía. Su diseño, se corresponde al de la Figura 14:

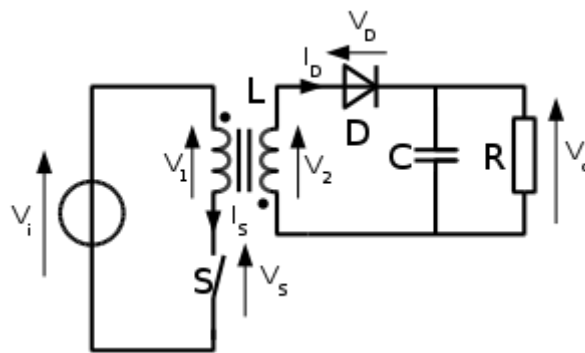


Figura 14: Esquema convertidor Flyback

La única diferencia frente al elevador-reductor es, que en este caso, se utiliza la relación de espiras cuando se referencian todos los cálculos a un lado del transformador o al otro:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{d}{(1-d)} \quad (17)$$

4.2.2. Convertidor Forward

En este caso, este convertidor se asemeja al funcionamiento del reductor y al contrario del Flyback, transfiere energía en vez de almacenarla (Figura 15):

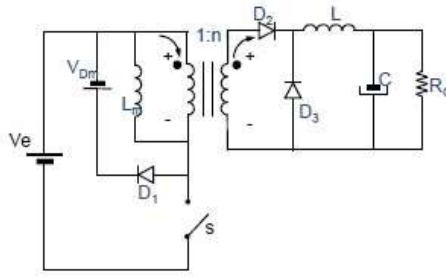


Figura 15: Esquema del convertidor Forward

Al tener 2 inductancias hay que fijarse en sus formas de onda de L y L_m para establecer las ecuaciones que relacionan V_e y V_{DM} con V_o . (Figura 16):

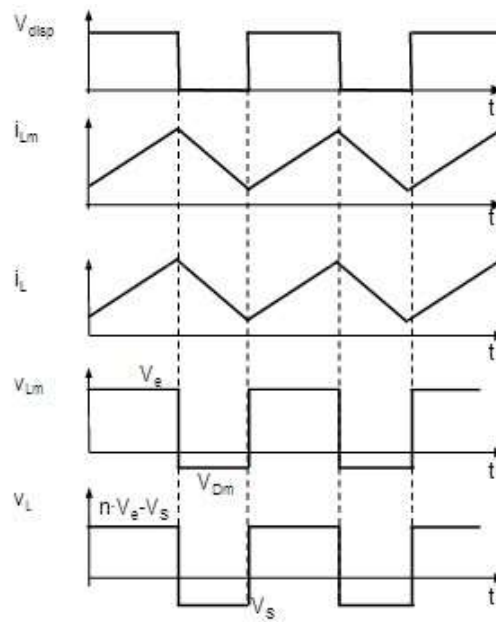


Figura 16: Formas de onda convertidor Forward

Para obtener la ecuación que rige el sistema hay que obtener la ecuación de L_m y luego la de L y se relacionan:

$$V_e \cdot t_{on} = V_{DM} \cdot t_{off} \quad (18)$$

$$V_{DM} = V_e \frac{d}{1-d} \quad (19)$$

$$(n \cdot V_i - V_o) \cdot t_{on} = V_o \cdot t_{off} \quad (20)$$

$$V_o = V_e \cdot n \cdot d \quad (21)$$

5. Elección de la topología

En el momento de decidir que convertidor hay que usar, se presentan todas las opciones explicadas anteriormente.

La cuestión más importante que hay que tener en cuenta, son los elementos de seguridad, es decir, el aislamiento galvánico. Como este elemento de seguridad es imprescindible que lo lleve incorporado el convertidor, el abanico de opciones se nos reduce bastante.

Una vez decidido eso, existen dos topologías a elegir: Flyback o Forward.

Estudiando el comportamiento de las dos topologías se usó el convertidor Forward porque entre sus ventajas, se tiene que su diseño es mucho más pequeño en relación con el Flyback (y es uno de los objetivos principales de este proyecto), también es mayor su rendimiento y genera menos ruido y menos rizado en la tensión de salida.

Por otro lado, el Flyback es más sencillo y más barato y es un convertidor multisalida, cosa que no interesa porque solo va a tener una única salida. Por último, el forward requiere de un menor nivel de corriente para su funcionamiento

Por otro lado, se tiene que mientras que un convertidor Flyback guarda la energía generada, el forward lo que hace es transferirla que es lo que hará nuestro convertidor, transferir la energía enviada por la batería a nuestro dispositivo.

6. Nuevo diseño con una sola pila de combustible

Lo que se pretende con este nuevo diseño con una sola pila es, en primer lugar, limitar el tamaño de la placa en varios aspectos, que es el principal objetivo del proyecto.

En un principio, los componentes podrían variar de un diseño a otro, porque en el antiguo, al tener 2 pilas, si una fallaba, el convertidor podía funcionar a 25W, por lo que los componentes también deberían de cumplir las condiciones necesarias para trabajar a esa tensión de entrada.

Como ahora solo se va a tener una pila de 50W, si se mantuvieran los mismos componentes, el convertidor estaría sobredimensionado, ya que los componentes serían demasiado buenos, en el sentido de que cubrirían situaciones que son imposibles que sucedieran. Más adelante se compararán los componentes del convertidor para ver si cumplen bien con las especificaciones que queremos o si hay que cambiarlos por otros.

7. Funcionamiento del convertidor Foward

En este apartado se va a explicar más a fondo el funcionamiento del convertidor Forward. Se va a relizar en dos partes: la primera será la explicación del convertidor en sí, mientras que la segunda será la explicación del “Low-Side Active Clamp”.

7.1. Convertidor Forward

Como ya se ha explicado anteriormente, este convertidor tiene las funciones básicas de un convertidor reductor, pero con aislamiento galvánico. Una de sus principales características es la de transferir energía a través del transformador.

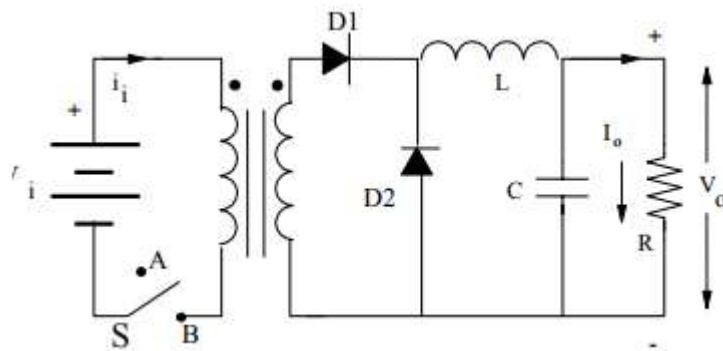


Figura 17: Esquema circuito Forward

Durante el funcionamiento de este convertidor, se pueden diferenciar claramente dos etapas, t_{on} y t_{off} . La principal diferencia entre las dos etapas son los componentes que van a permitir el paso de la corriente, ya que esta siempre va a tender por circular por algún camino.

En la etapa t_{on} , el transistor S se cerrará para así de esta manera poder alimentar todo el sistema, mientras que el diodo D3 no va a dejar pasar la corriente puesto que si lo hiciera produciría un cortocircuito, el que sí que conducirá será el diodo D2 para poder dar paso a la corriente generada por el transformador. Por último, el condensador que se encuentra en paralelo con la resistencia se va a ir descargando para así poder mantener el nivel de tensión a la salida constante (Figura 18):

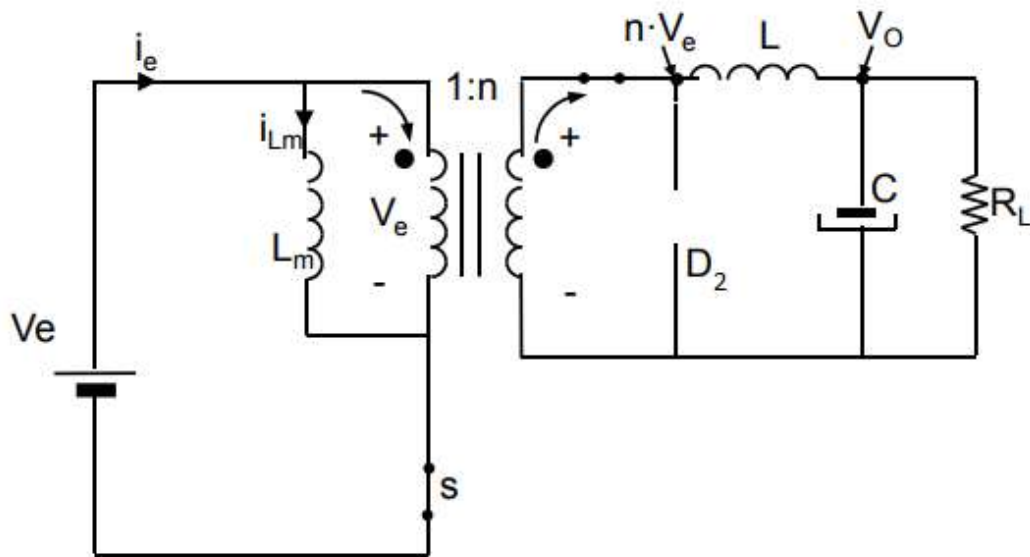


Figura 18: Esquema Forward período t_{on}

Cuando el circuito se encuentra en t_{off} , el transistor MOSFET deja de conducir por lo que la corriente buscará un camino alternativo, y en este caso, los caminos alternativos que se presentarán serán por la inductancia magnetizante y por el condensador (Figura 19).

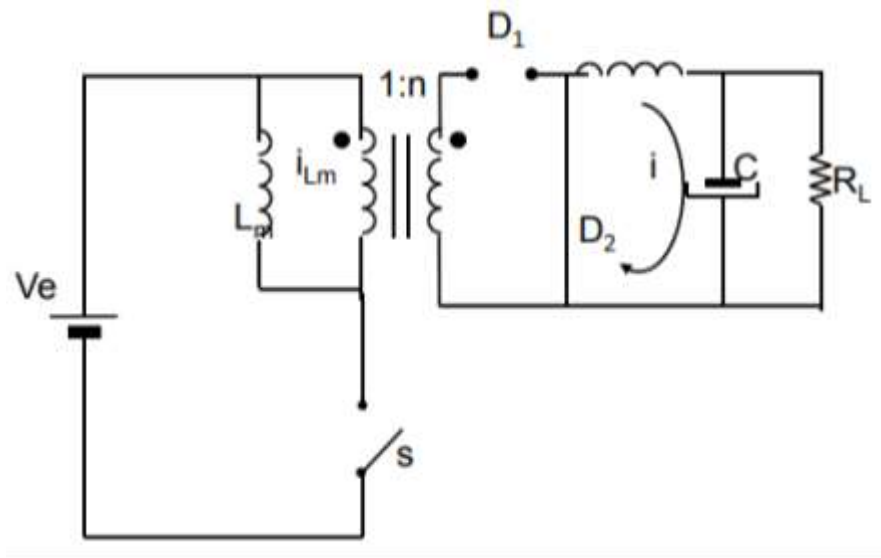


Figura 19: Esquema Forward período t_{off}

En esta etapa hay dos caminos por los que puede circular la corriente, uno de ellos, es el que va por la inductancia magnetizante, donde esta se va a ir descargando progresivamente hasta que el convertidor vuelva a la etapa t_{on} .

En el segundo camino que se puede observar, se ve que es el proporcionado por el condensador que va a ser el encargado de alimentar a la resistencia y por tanto su descarga va a servir como fuente de alimentación.

Estos dos elementos durante la etapa t_{on} , se van a ir cargando y en el momento de cambio de etapa se descargarán para realizar las funciones anteriormente explicadas.

Para que esto se cumpla hay tres condiciones que van a asegurar el modo de régimen permanente [1]:

- ✦ La primera condición pretende conseguir que no se sature la bobina, y esto se obtiene cuando la variación de la corriente por la misma es cero, de esta manera se controla la corriente máxima y mínima que circula por ella, y según la ecuación fundamental de la bobina:

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (22)$$

De aquí se puede deducir que para que la variación de corriente sea 0, la única opción que existe es que $\bar{V}_L = 0$.

- ✦ La segunda condición tiene que ver con el condensador, y de igual modo que en con la bobina, se tiene su ecuación fundamental:

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} \quad (23)$$

En este caso, el objetivo es que la tensión de salida sea lo más constante posible, es decir, que $\Delta V_0 = 0$, por lo que al igual que antes, la única opción que queda es que $\bar{I}_C = 0$.

- ✦ Por último, se tiene la condición que se aplica a cualquier circuito eléctrico o electrónico. El balance de potencias entre la entrada y la salida que debe cumplirse siempre y bajo cualquier condición.

$$P_i = P_o \quad (24)$$

Esas son las condiciones para régimen permanente. Otra condición importante en los convertidores es si se va a trabajar en MCC o en MCD. La siguiente condición asegura el MCC.

$$\frac{\Delta I_L}{2} < \bar{I}_L \quad (25)$$

Una vez explicado todo el funcionamiento teórico del convertidor, se pueden ver las formas de ondas que describen este sistema, para los distintos componentes:

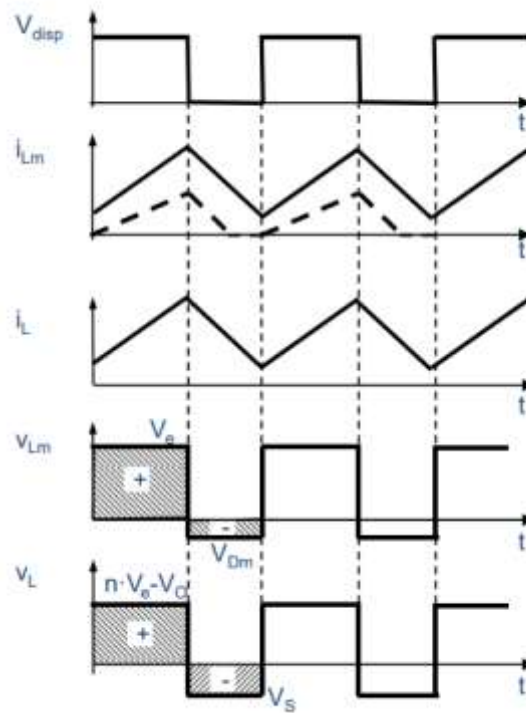


Figura 20: Formas de onda de los principales componentes del circuito Forward

Aquí se puede ver de manera muy clara las dos etapas descritas en apartados anteriores y como la bobina se carga y se descarga dependiendo de la etapa.

7.2. Diseño del convertidor

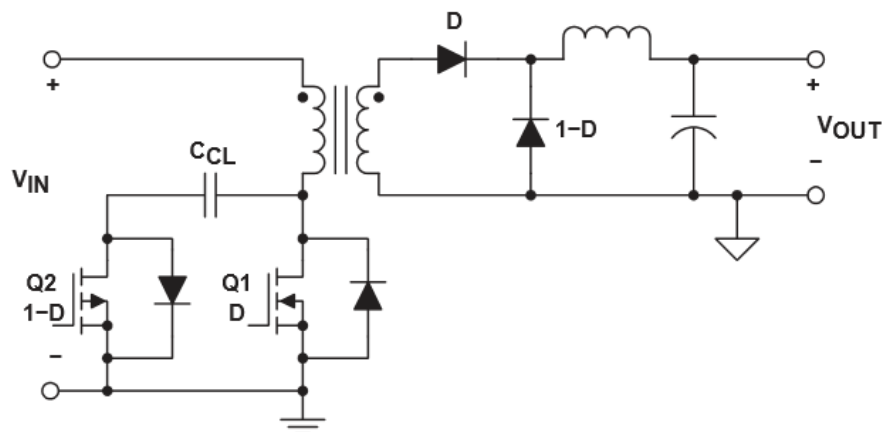


Figura 21: Esquema convertidor

El convertidor elegido no es un Forward con tres devanados que es el que se ha descrito anteriormente, aunque con variantes.

Una vez decidida la topología Forward, hay que elegir entre otras dos opciones: “low side” o “high side”.

El elemento que diferencia un “low side” de un “high side” es el mosfet Q2, en “low side” se sitúa en paralelo con Q1 y en serie con el condensador C_{CL} , mientras que en el “high side” se sitúa en serie con el condensador C_{CL} pero en paralelo con el transformador en vez de con Q1.

Otra de las principales diferencias es que mientras que en “low side”, la tensión que recibe el transformador es la diferencia entre V_C (tensión en el condensador) y V_{IN} (tensión a la entrada) (Figura 22), en el “high side” es directamente la tensión V_C la que pasa al transformador (Figura 23).

Para este caso, se eligió el convertidor “low side active clamp circuit”.

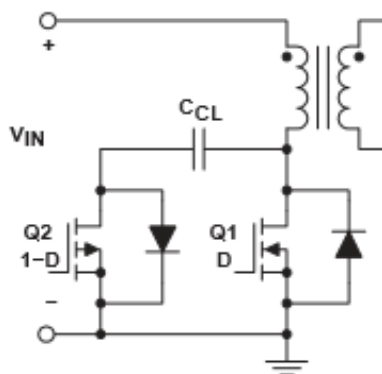


Figura 22: Low side

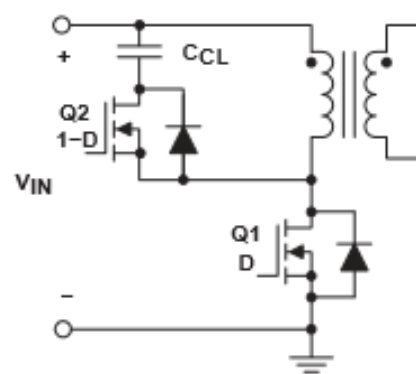


Figura 23: High side

El funcionamiento del convertidor se debe de separar en tres tramos:

- El primer tramo sería cuando se cierra el circuito, donde el mosfet Q1 es el encargado de conducir, y por tanto la tensión de entrada (V_{IN}) es la que se aplica a la inductancia magnetizante y la transmitida al transformador.
- El segundo tramo de esta tipología es un tiempo muerto que se produce desde que el mosfet Q1 se abre hasta que empieza a conducir el mosfet Q2. Durante

este tiempo muerto, la corriente se mantiene constante y circula tanto por Q1 como por Q2. A este periodo de tiempo se le conoce como el tiempo en el que las condiciones están dadas para una tensión igual a cero voltios. (ZVS: Zero Voltage Switching).

- El último tramo se encuentra cuando se produce un cambio y conduce el mosfet Q2. En este caso, la tensión que le llega al transformador pasa a ser la diferencia entre V_C y V_{IN} . Para que esto sea posible, el mosfet Q2 tiene que ser un canal-P, para así favorecer la dirección de la corriente. También hay que añadir que la corriente que pasa por Q2 es la misma que la que atraviesa la inductancia magnetizante.

Una vez decida la tipología del convertidor a usar, vamos a explicar el diseño de este convertidor Forward. El diseño básico de este convertidor se puede asemejar en gran manera al de un “Reductor”, entre otras cosas, por la colocación de la inductancia después el transformador, ya que en un convertidor elevador la llevaría colocada antes del mismo.

7.3. Diseño de los componentes

En este apartado se van a analizar todos los componentes usados para el circuito y explicaremos con fórmulas y datos, el porqué del sistema.

7.3.1. Transistores

El transistor es un elemento importante del circuito puesto que es el que encarga de gestionar los pulsos de disparo que le llegan y de esta manera cortocircuita o abre la fuente de alimentación, generando así las distintas etapas que ya se han explicado en otros apartados.

Para poder saber si los transistores elegidos son los más apropiados, se han comparado con otros componentes del mercado y se ha podido comprobar que son los mejores en cuanto a prestaciones se refiere. Hay algunos elementos que cumplen alguna especificación de mejor manera que los MOSFET propuestos, pero en cualquier caso, ninguno es tan completo como los propuestos.

MOSFET	Vds(max)	I _{ef}	I _{max}	I _{med}	Power Dissipation	Price	Dimensiones
30% de seguridad	62/22 V		7,15/2,5 A				
Condiciones del circuito a 12V	17,01 V	0,9899 A	1,96 A	0,533 A			
Condiciones del circuito a 33,8V	47,66 V	2,77 A	5,5 A	1,86 A			
IRF6216 (Tipo p)	150 V	13,43 A	19 A		2,5 W	1,09 €	5 x 4 x 1.5mm
IRFR825TRPbF (Tipo n)	500 V	4,24 A	6 A		119 W	1,05 €	
IRF9520 (Tipo p)	100 V	19,09 A	27 A		60 W	0,95 €	10.41 x 4.7 x 9.01mm
IRF820 (Tipo n)	500 V	5,65 A	8 A		50 W	0,85 €	10.41 x 4.7 x 9.01mm
TT8M1TR	20 V		2,5 A		1,25 W	0,33 € (10 ud.)	3 x 1.6 x 0.8mm
CSD25484F4T	20 V		2,5 A		0,5 W	0,333 € (10 ud.)	1.04 x 0.64 x 0.2mm
FQP19N20	200V		19,4 A		140 W	1,25 €	28 x 10 x 4,5 mm

Tabla 1: Comparativa MOSFET

Por lo que los transistores elegidos serán el IRF6216 y el transistor FQP19N20

Cuando se realicen las simulaciones, se comparará con los valores propios del componente para ver las condiciones en las que trabaja el transistor, para cumplir las especificaciones, se aplicará un coeficiente de seguridad (CdS) del 30%.

En este caso tenemos que usar dos transistores, un canal p y un canal n para así poder cumplir con las características de nuestro tipo.

En la Tabla 2, podemos ver la relación de los datos entre sí y de esta forma vemos como se cumplen las especificaciones del sistema.

MOSFET	Simulación	CdS	IRF6216	FQP19N20
V _{ds}	47,66 V	62 V	150V	200V
I _{máx}	5,5 A	7,15 A	19A	19A

Tabla 2: Valores característicos de los transistores mosfet



Figura 24: Mosfet IRF6216



Figura 25: Mosfet FQP19N20

7.3.2. Diodo

El diodo también es un elemento importante ya que es el que permite o no, el paso de la corriente por unas zonas u otras. De esta manera, la carga siempre se mantendrá alimentada ya que siempre uno de los diodos va a estar “activado” para que pueda circular corriente por él.

Al igual que con los MOSFET, se comparan los elementos que se encontraban en el diseño antiguo para así poder ver si existe algún componente con mejores condiciones.

DIODO	Imed	Imax	Vf	rd	Dimensiones	Price
30% de seguridad	1,13/1,3 A	1,6/4,7 A	23/65 V			
Condiciones del circuito a 12V	0,871 A	1,29 A	17,99 V			
Condiciones del circuito a 33,8V	1 A	3,6189 A	50,3 V			
50WQ06FN	5,5 A	105/320 A	60 V	25,5 mΩ	2.39 x 6.73 x 6.22mm	0,772 € (5 ud.)
MBRS360T3G		4 A	60 V		2.13 x 6.86 x 5.84mm	0,36 € (1 ud.)
NRVBS360T3G		4 A	60 V		4.6 x 3.95 x 2.09mm	0,638 € (10 ud.)
SBR660CTT4G	3 A	6 A	60 V		6.73 x 6.22 x 2.38mm	0,326 € (5 ud.)
PMEG2020EH		2 A	20 V		1.2 x 2.7 x 1.7mm	0,084 € (20 ud.)
SS22-E3/52T		2 A	20 V		4.57 x 3.94 x 2.24mm	0,179 € (20 ud.)
ESH2PB-M3/84A	2 A		100 V		2,18 x 4 x 1,15 mm	0,315 € (1 ud.)
RS2B	2 A		100 V		3,73 x 4,75 x 2,61 mm	0,126 € (5 ud.)

Tabla 3: Tabla comparativa Diodo

Tras realizar esta comparación, se puede ver que hay algunos componentes que cumplen alguna condición de mejor manera que nuestro componente propuesto, pero en términos globales, es el que mejor se adapta al sistema, por lo que el diodo 50WQ06FN es el elegido para nuestro circuito.

Al igual que en el transistor, cuando realicemos la simulación, al igual que con los transistores, veremos bajo en qué condiciones funcionan para cumplir con las especificaciones. Igualmente, se les aplicará un CdS del 30%.

Los distintos valores obtenidos se reflejan en la Tabla 4:

DIODO	Simulación	CdS	50WQ06FN
Vf	50,3 V	65 V	60 V
Imáx	3,62 A	4,7 A	320 A

Tabla 4: Valores característicos para los diodos del circuito



Figura 26: Diodo 50WQ06FN

En este caso, las características del diodo 50WQ06FN no son tan claras como en el caso de los transistores ya que aquí nos encontramos con una $I_{m\acute{a}x} = 320\text{ A}$ y $V_f = 60\text{ V}$. Si lo comparamos con los valores obtenidos en la simulación, vemos que nos valen, pero para el CdS, el de la tensión es algo menor.

7.3.3. Condensador

Los condensadores elegidos en esta ocasión son los modelos EEUF1H330 y EEUF1H561S. Estos fueron los elegidos para cumplir con las exigencias del circuito, como son la variación de la tensión de salida, o los condensadores de entrada que hay que poner para que funcione el sistema.



Figura 27: Condensador de 560uF y de 32uF

7.3.4. Bobina

A la hora de diseñar la bobina, partimos igualmente de un modelo anterior de 100uH, por lo que se comparó con otros componentes para ver si los había con mejores prestaciones:

BOBINA	I_{max}	I_{ef}	Indutancia	Price
Condiciones del circuito a 12V	1,2928 A	1,2310 A	100μH	
Condiciones del circuito a 33,8V	3,6198 A	3,44 A	100μH	
PCV-2-104-05L	7,92 A	5,6 A	100μH	3,80 €
1120-101K-RC	5,65 A	4A	100μH	6,26 €
RFB1010-101L	3,11 A	2,2 A	100μH	0,68 €

Tabla 5: Tabla comparativa Bobina

Tras realizar la comparación con los demás componentes, se pudo ver que era la mejor opción para nuestro circuito, así que se decidió usar la bobina PCV-2-104-05L.

Para la bobina, se ha elegido la PCV-2-104-05L y al igual que se ha realizado con el resto de componentes, tras haberlo simulado, se han obtenido los siguientes valores de referencia (Tabla 6):

BOBINA	Simulación	CdS	PCV-2-104-05L
I _{max}	3,62 A	4,7 A	7,92 A
Indutancia	100μH	100μH	100μH

Tabla 6: Valores característicos para la bobina



Figura 28: Bobina PCV-2-104-05L

7.3.5. Transformador

El transformador es el elemento más importante en este proyecto, ya que es el elemento a partir del cual vamos a poder reducir el tamaño de nuestro convertidor, porque una vez analizados los demás componentes, se ha podido ver que no los hay mejores en el mercado.

Para el diseño del transformador hay que comenzar con la ley de Faraday, con la que se obtiene el número de espiras en función de la tensión que se tenga en ese devanado:

$$v_1 = n_1 * \frac{d\phi}{dt}; \quad (47)$$

Si se desarrolla la ecuación del flujo magnético, se llega a:

$$v_1 = n_1 * \frac{d(B * A_c)}{dt} = n_1 * A_c * \frac{dB}{dt}; \quad (48)$$

y como se va a tomar que el tiempo en el que se genera y la tensión de ese devanado $v_1 = \text{cte}$, entonces,

$$n_1 = \frac{v_1 * \Delta t}{A_C * \Delta B} \quad (49)$$

; donde A_C es el área transversal del núcleo y ΔB es el material del núcleo.

Para n_2 es lo mismo, pero cambiando las variables al otro lado del transformador: $n_2 = \frac{v_2 * \Delta t}{A_C * \Delta B}$ o también se puede usar la expresión: $n_2 = n_1 * r t$.

A la hora de obtener la gráfica de la corriente sobre la inductancia magnetizante, hay que tener en cuenta una apreciación, y es que si el flujo se encuentra centrado en el origen o si se encuentra en el primer cuadrante. Teniendo en cuenta esto, ΔB valdrá una cosa u otra.

En este caso, como el convertidor elegido es un “Active - Clamp”, el flujo se encuentra centrado en el origen.

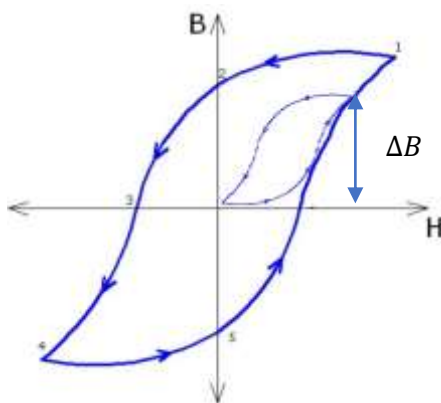


Figura 29: En el flujo en el primer cuadrante

$$\Delta B = B_{\text{máx}}$$

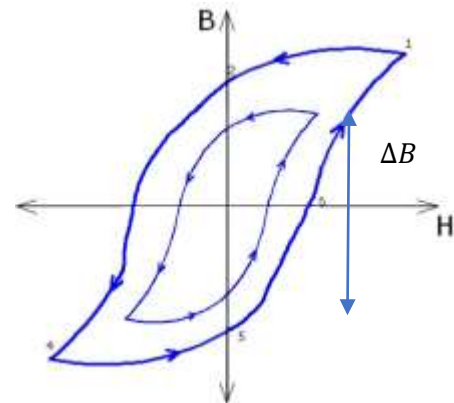


Figura 30: En el flujo centrado en el origen

$$\Delta B = 2 * B_{\text{máx}}$$

Para el material elegido, se va a usar una $B_{\text{máx}} = 300 \text{mT}$.

A continuación, hay que calcular la profundidad pelicular, que es la distancia que se queda entre un cable y su “cobertura”, para poder obtener más tarde el número de

espiras en paralelo y así de esta manera obtendríamos el cable apropiado para nuestro componente.

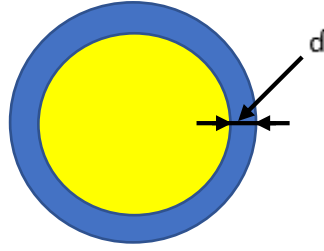


Figura 31: Profundidad pelicular

$$d = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \sigma \cdot f \cdot \mu}} \quad (50)$$

; donde σ es la conductividad del cobre y μ es la permeabilidad del cobre.

$$d = \frac{1}{\sqrt{58 \cdot 300 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}} = 0.12065 \text{ mm}$$

Una vez obtenida la profundidad pelicular, se calculará la sección del conductor para que el cable no se caliente demasiado

$$J = \frac{I_{ef}}{A_w} = \frac{I_{ef}}{N_p \cdot \pi \cdot d^2} \leq 10 \frac{A}{\text{mm}^2} \quad (51)$$

; de esta ecuación se obtendrá el número de espiras en paralelo:

$$N_{p1} \geq \frac{I_{ef1}}{I_{\text{máx}} \cdot \pi \cdot d^2} \quad (52)$$

y N_{p2} se calcula de la misma manera: $N_{p2} \geq \frac{I_{ef2}}{I_{\text{máx}} \cdot \pi \cdot d^2}$

Tras haber obtenido la última ecuación que define al condensador, se pasa a calcular todas las variables para distintos tamaños de núcleo según el fabricante “Ferrocube”.

Inicialmente se estudiaron como posibles encapsulados los correspondientes con la “Tabla 3” y se puede apreciar fácilmente que eran muy grandes para conseguir nuestro objetivo, dado que las espiras no llegaban casi a una vuelta.

3F3	Ac (Effective Area)(mm ²)	Wa (winding area)(mm ²)	Al (nH)	MLT (average length of turn) (mm)	n1	n2	Np1	Np2
RM8/I	0,000063	30,9	3000	42	0,7102	1,0653	6,0567	4,0670
RM10/I	0,0000966	44,2	4050	52	0,4632	0,6948	6,0567	4,0670
RM12/I	0,000146	75	5600	61	0,3065	0,4597	6,0567	4,0670
RM14/I	0,000198	111	5700	71	0,2260	0,3390	6,0567	4,0670

Tabla 7: Valores de transformador para material 3F3

Es por eso que se decidió observar los resultados, pero en unos encapsulados más pequeños.

3E5	Ac (Effective Area)(mm ²)	Wa (winding area)(mm ²)	Al (nH)	MLT (average length of turn) (mm)	n1	n2	Np1	Np2
RM4/I	0,0000183	5,5	3500	20	2,4450	3,6675	6,0567	4,0670
RM6S/I	0,000037	6,2	2150	31	1,2093	1,8139	6,0567	4,0670

Tabla 8: Valores de transformador para material 3E5

Finalmente se decidió usar el encapsulado RM4/I lo cual reduce bastante el tamaño y con ello conseguimos el objetivo de poder reducir el tamaño de la placa.

Todos los datos se han obtenido de las hojas de características del fabricante, salvo los valores de n1, n2, Np1 y Np2, que se han obtenido con las fórmulas anteriormente explicadas.

Una vez obtenidos estos valores, se puede ver que la relación de espiras más apropiada para nuestro sistema es de 2:3, dado que lo idóneo es dar vueltas enteras.

Finalmente, el diseño del transformador quedó de la siguiente forma:



Figura 32: Diseño final del transformador

7.3.6. Resistencia de carga

La resistencia es muy simple calcularla ya que tenemos cual debe de ser tanto la tensión de salida como la potencia:

$$R = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{14.4^2}{50} = 4.147 \, \Omega \quad (53)$$

7.4. Cálculos teóricos

Una vez vistas las formas de onda, se van a explicar las principales ecuaciones para poder obtener los valores característicos de cada componente.

Lo primero es obtener la ecuación con la que se obtendrá el ciclo de trabajo que será lo que determine en gran parte el funcionamiento del convertidor.

Para ello, se procederá a hacer un balance de voltios por segundo, de esta manera se obtendrán dos ecuaciones, una por cada etapa de funcionamiento. En ambas ecuaciones se trata de averiguar el valor de \bar{V}_L :

$$\bar{V}_L = \left(\frac{V_e}{n} - V_o \right) dt \quad (t_{on}) \quad (26)$$

$$\bar{V}_L = V_o(1 - d)t \quad (t_{off}) \quad (27)$$

El siguiente paso es igualar las ecuaciones (26) y (27) y despejar la tensión de salida entre la de entrada

$$\left(\frac{V_e}{n} - V_o\right) dt = V_o(1 - d)t \quad (28)$$

$$\frac{d}{n} = \frac{V_o}{V_e} \quad (29)$$

$$d = \frac{V_o}{V_e * n} = \frac{14.4}{33.6 * 3} = 0.2857$$

Donde n es la relación de espiras del transformador.

A continuación, hay que comprobar que el sistema trabaje en MCC como ya se ha explicado antes. Para ello, tenemos que desarrollar ambos lados de la igualdad de la ecuación (25), para obtener la variación de la corriente por la bobina hay que recurrir a la ecuación fundamental de la misma, y desarrollándola, se obtiene que:

$$\Delta I_L = \frac{V_L}{L} * \Delta T = \frac{V_o}{L} * (1 - d) * T \quad (28)$$

$$\Delta I_L = \frac{14.4}{100 * 10^{-6}} * (1 - 0.2857) * \frac{1}{300 * 10^3} = 0.34 A$$

Una vez obtenido un lado de la ecuación, toca obtener el valor medio de la bobina por lo que hay que realizar una ley de nudos justo después de la bobina, de esta forma tenemos que

$$i_L = i_c + i_o \quad (29)$$

$$\bar{i}_L = \bar{i}_c + \bar{i}_o \quad (30)$$

Por lo explicado anteriormente y para cumplir el régimen permanente, la corriente media en el condensador es cero:

$$\bar{i}_L = I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{50}{14.4} = 3.47 A$$

Una vez obtenidas las dos partes de la ecuación, se introducen los dos resultados obtenidos para comprobar si se cumple la condición de la ecuación (25):

$$\frac{0.34}{2} \leq 3.47$$

Claramente se puede observar cómo se cumple la ecuación, por lo que se ha conseguido demostrar que el convertidor trabaja en MCC.

8. Resultados de simulación

8.1. Simulación del circuito en condiciones normales

En el esquema mostrado a continuación, se puede ver cómo se distribuyen los componentes en el programa PSIM, que es la herramienta que se va a utilizar para simular el circuito y así poder ver los valores característicos.

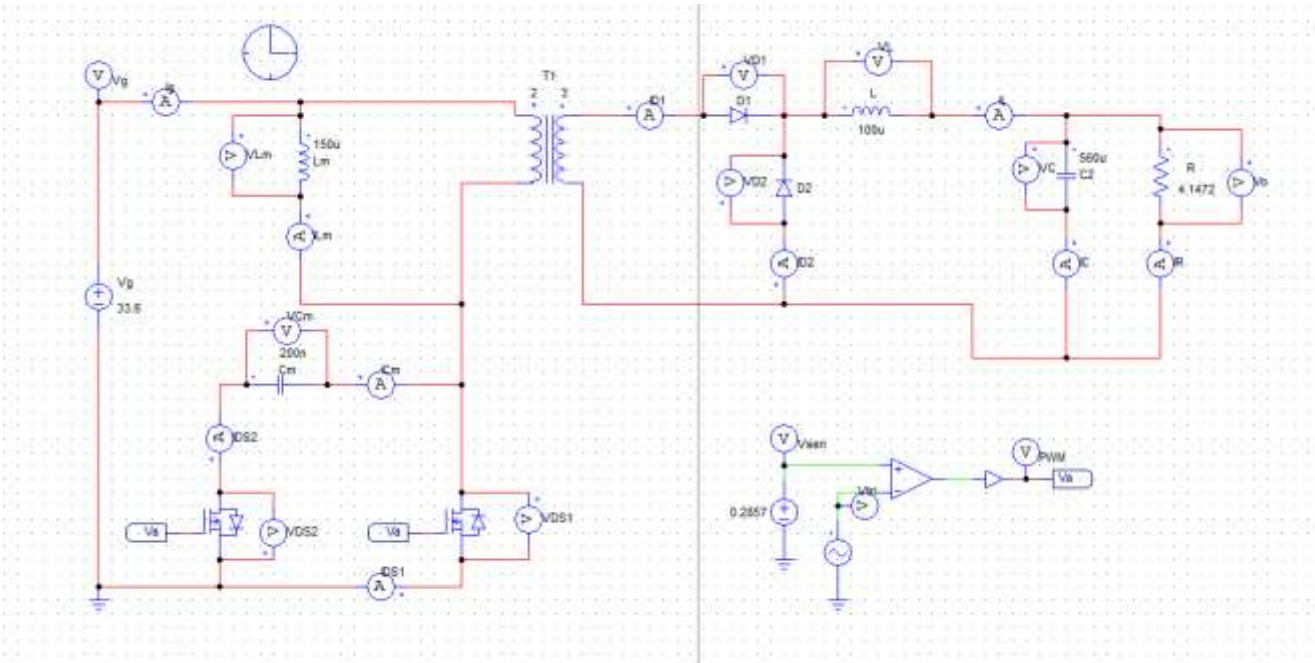
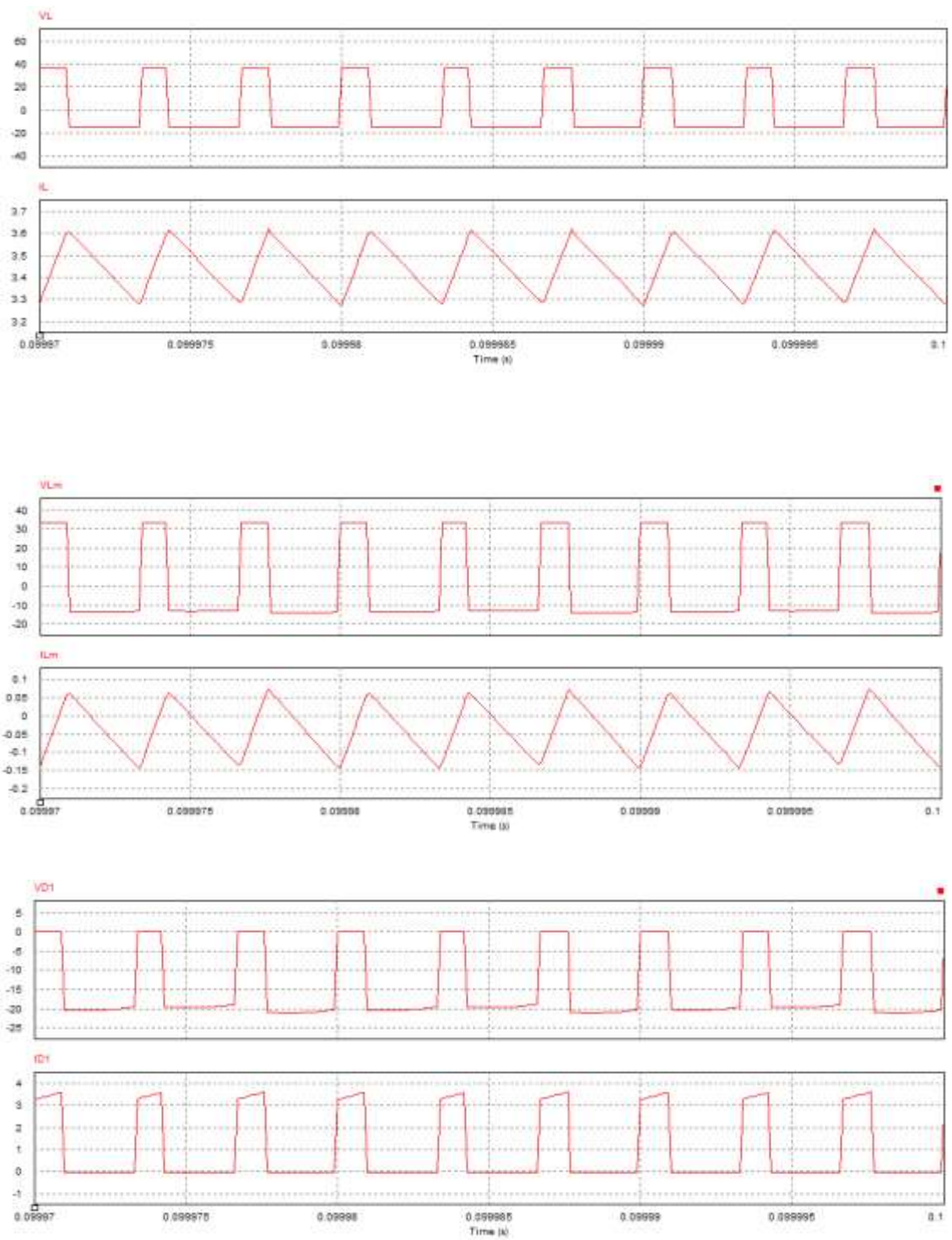


Figura 33: Esquema del circuito en el programa de simulación en condiciones normales

Una vez realizada la simulación, se obtienen las siguientes formas de onda de los elementos más significativos, cuyos valores medios son los siguientes:

Average Value		
Time	From	1.0000000e-007
Time	To	1.0000000e-001
VL		3.2363082e-001
IL		3.5444900e+000
VLm		2.0563138e-001
ILm		-3.8456055e-002
Vo		1.4368486e+001
IR		3.4646234e+000
VD1		-1.4383680e+001
ID1		1.0284241e+000
VDS1		3.3394366e+001
IDS1		1.5315860e+000

Tabla 9: Valores medios en condiciones normales



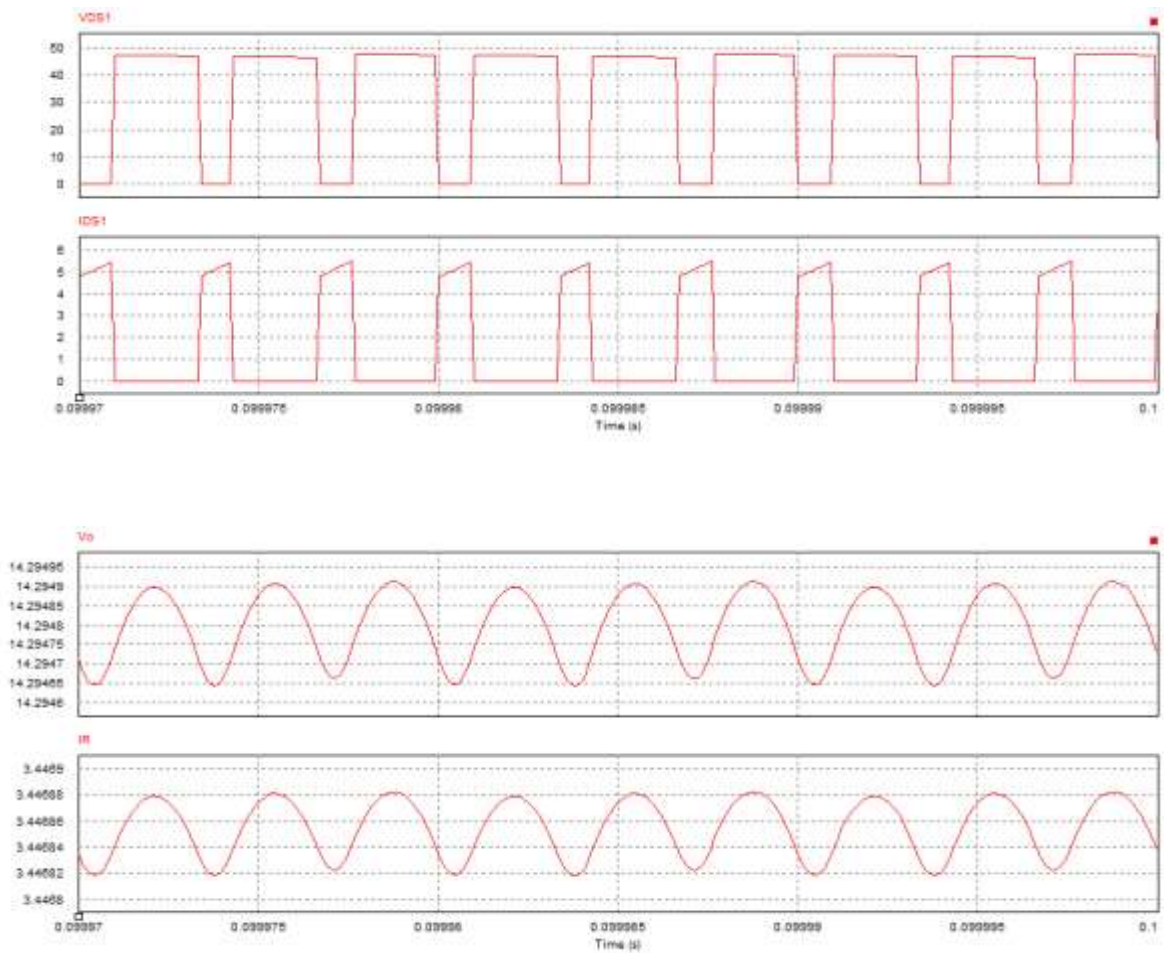


Figura 34: Formas de onda del convertidor en condiciones normales

Una vez analizadas las formas de onda obtenidas de la simulación, se pueden observar características importantes de nuestro diseño, como que la corriente media por la bobina magnetizante es menos que cero, o que el rizado en la tensión de salida en un 1% de dicha tensión, tal y como viene dado en las especificaciones. En la siguiente tabla se pueden ver los valores medios de entrada al sistema.

Average Value	
Time From	9.9969900e-002
Time To	1.0000000e-001
Vg	3.3600000e+001
Ig	1.4678946e+000

Tabla 10: Valores medios de entrada en condiciones normales

A continuación, se van a realizar unas simulaciones para así poder ver cómo se comporta el sistema en función de la relación de transformación que se le aplica.

8.2. Simulación del sistema con $r_t = 1$

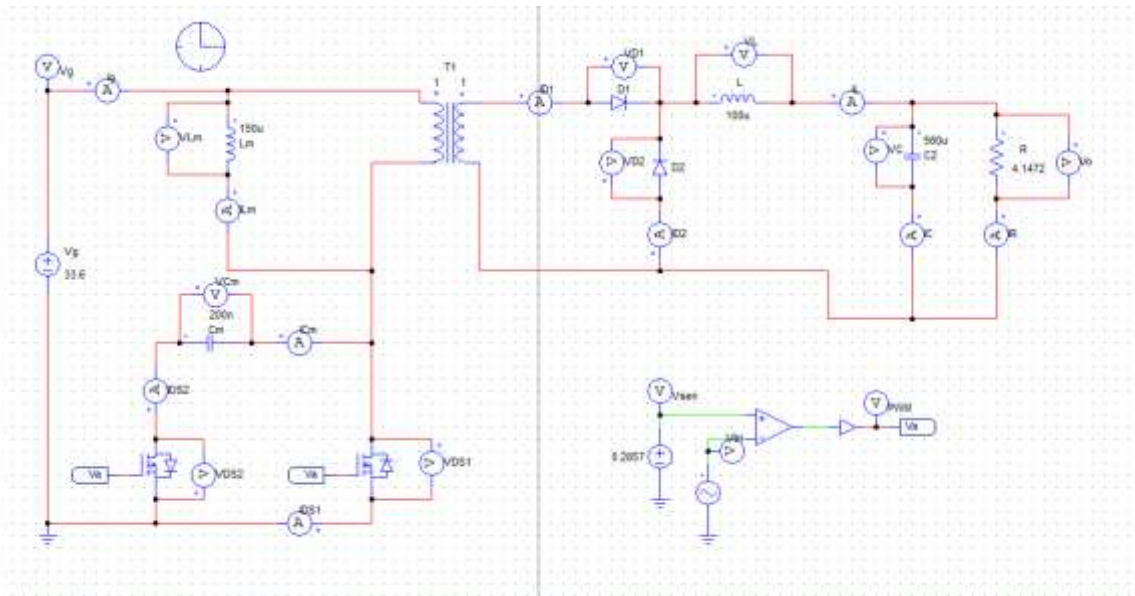
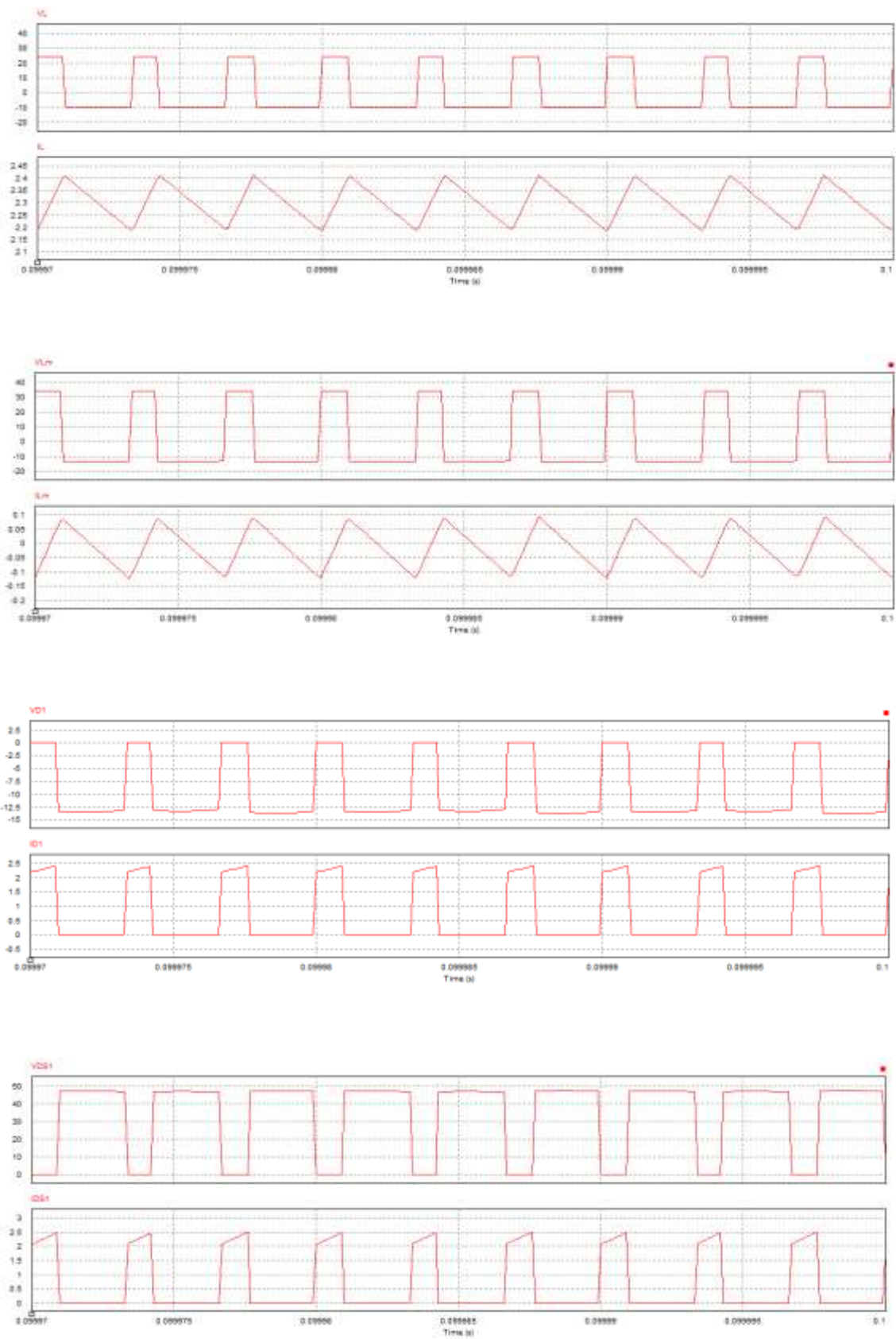


Figura 35: Esquema del convertidor con $r_t = 1$

Average Value		
Time	From	1.0000000e-007
Time	To	1.0000000e-001
VL		2.1390049e-001
IL		2.3636103e+000
VLm		2.0319202e-001
ILm		-1.7003327e-002
VD1		-9.5922241e+000
ID1		6.8583733e-001
VDS1		3.3396807e+001
IDS1		6.8090765e-001
Vo		9.5815095e+000
IR		2.3103563e+000

Tabla 11: Valores medios para una $r_t = 1$

Para realizar esta simulación hemos cambiado la relación de transformación del trasformador para ver el comportamiento del sistema:



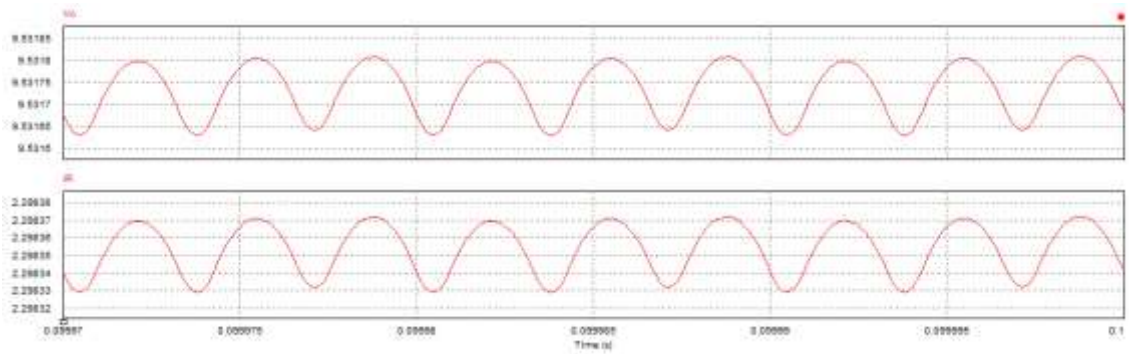


Figura 36: Formas de onda para una $rt = 1$

En este caso hay que darse cuenta que al tener una $rt = 1$, los valores medios de la mayoría de los componentes se ven incrementados.

8.3. Simulación del sistema con $rt = 2$

En este apartado se realizará otra simulación del circuito, pero con una relación de transformación igual a dos.

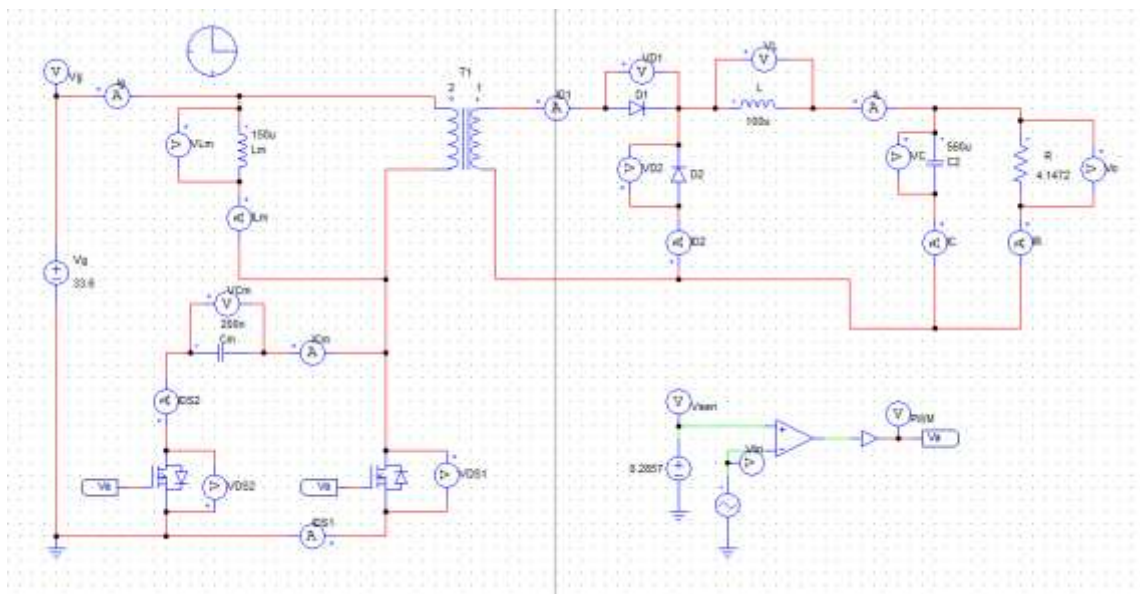
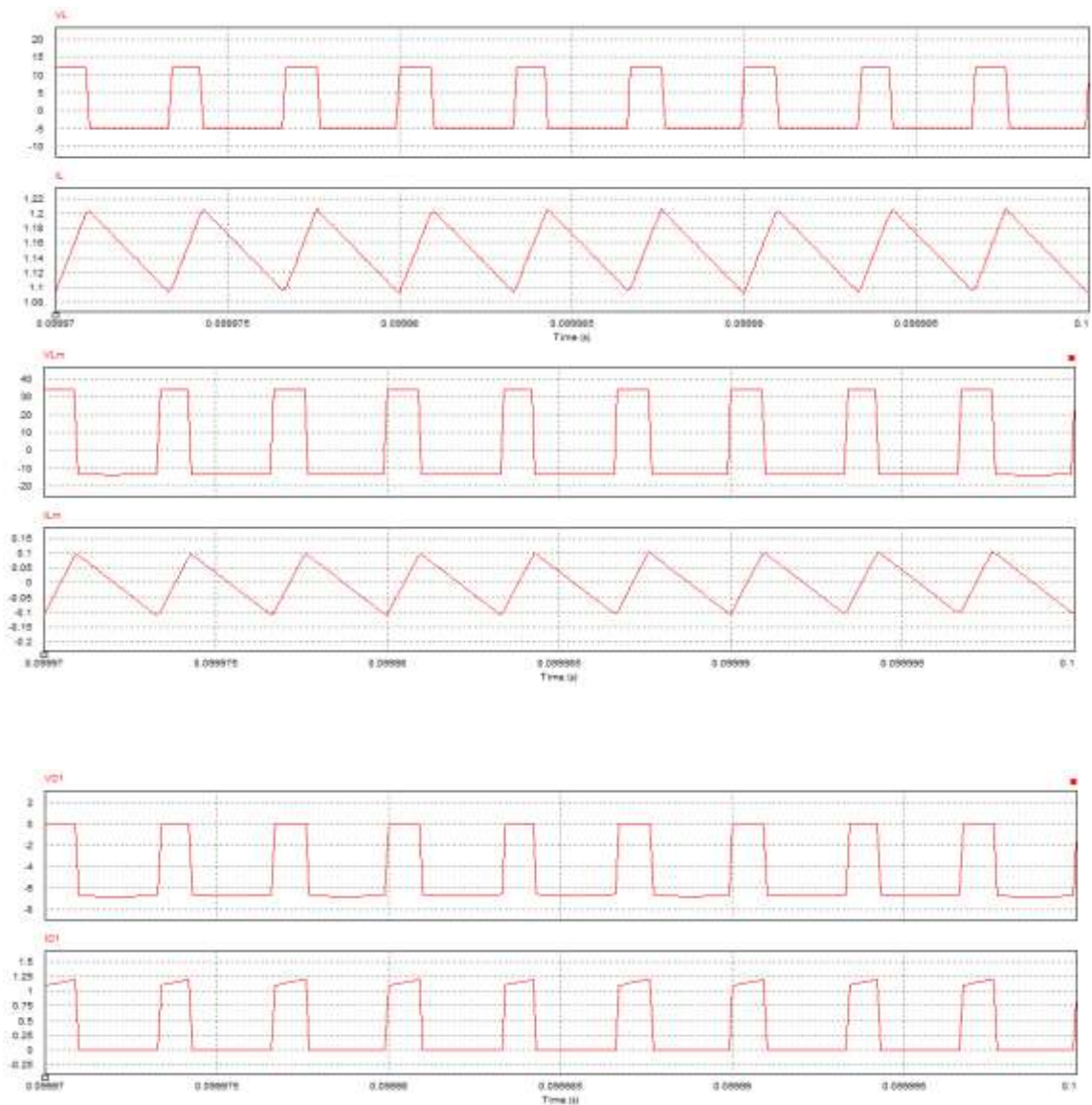


Figura 37: Esquema del convertidor para una $rt = 2$

Los valores medios de los componentes en este caso serían los siguientes.

Average Value		
Time	From	9.9969900e-002
Time	To	1.0000000e-001
VL		1.2892266e-001
IL		1.1488817e+000
VLm		2.9800695e-001
ILm		-4.8168216e-003
VD1		-4.7463475e+000
ID1		3.3480241e-001
VDS1		3.3301993e+001
IDS1		1.6581410e-001
Vo		4.7664256e+000
IR		1.1493117e+000

Tabla 12: Valores medios para una $r_t = 2$



Al analizar el comportamiento del sistema mientras se cambia la relación de transformación del transformador, este se comporta de tal manera que, si se disminuye la relación de transformación, por lo general aumentan todos los valores medios del sistema. Mientras que, si aumenta esta relación, los valores tienden a aumentar.

Todo esto depende de la relación de espiras del transformador ($n = \frac{N_p}{N_s}$), porque si tenemos una relación, mayor que uno, quiere decir que queremos que las variables de los elementos que se encuentran en el devanado secundario del transformador sean pequeñas, mientras que, si es menor que uno aumentaremos estos valores.

9. Comparación de la huella del convertidor

Como el objetivo principal del proyecto es la reducción de tamaño de la placa, se van a comparar las dos huellas para así poder comprobar que efectivamente se ha reducido.

Para el diseño de la placa se tuvieron que usar dos programas complementarios, uno es el “OrCad Capture CIS” en el que se diseña el circuito para así poder realizar simulaciones. En este programa se realizará el esquema del circuito con todos los componentes necesarios como muestra la figura 46. Una vez diseñado el circuito, es necesario asignar a cada componente una huella. En algunos casos no es posible asignarle una huella por lo que ese campo se quedará vacío.

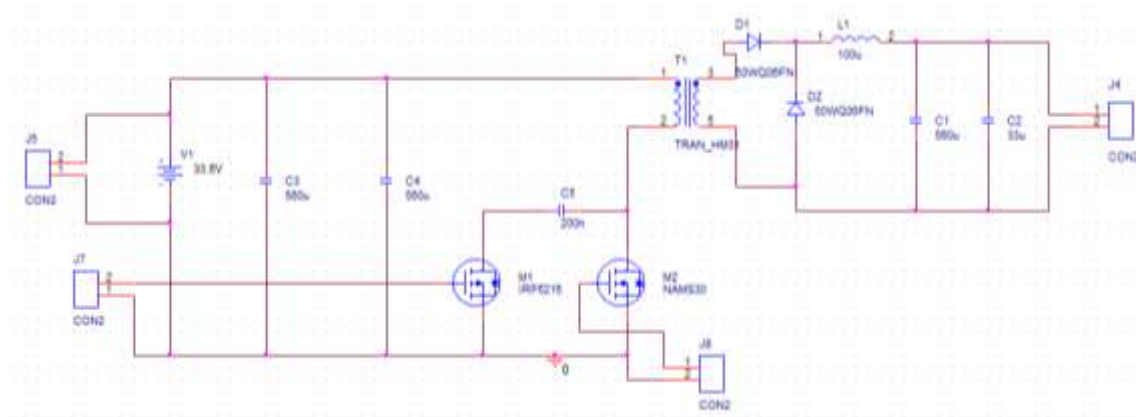


Figura 39: Esquema del convertidor en el programa “OrCad Capture CIS”

Una vez creado el circuito, es importante generar una serie de archivos que van a servir para tener más datos sobre el sistema, como pueden ser:

- ✦ “Netlist” donde se encuentran internamente toda la disposición de los componentes. Más adelante se explicará con más detalle, ya que este archivo es imprescindible para el siguiente programa.

- ✦ “BOM” (Bill of Materials), en este archivo es donde se encuentra la “lista de la compra” del circuito, con los componentes, el modelo, la cantidad de los mismos.....

Bill Of Materials		September 19, 2017		18:04:11	Page1
Item	Quantity	Reference	Part		
1	3	C1,C3,C4	560u		
2	1	C2	33u		
3	1	C5	200n		
4	2	D1,D2	50WQ06FN		
5	4	J1,J2,J3,J6	CON1		
6	4	J4,J5,J7,J8	CON2		
7	1	L1	100u		
8	1	M1	IRF6216		
9	1	M2	NAMS30		

Tabla 14: BOM de nuestro convertidor

- ✦ “DSN” este archivo se genera automáticamente y en él, se encuentra todo el diseño del circuito.

El segundo programa es el “OrCad Layout”, este programa va a ser el encargado de diseñar la colocación de los componentes de la manera más eficaz posible.

En el anterior programa se ha dicho que a los componentes hay que asignarles una huella que es como su “sombra”. Hay algunos componentes a los que no se les puede asociar una huella, o bien porque no exista o porque no se le puede asignar ninguna de las que existen en las librerías.

En estos casos se presentan dos opciones:

- ✦ Generar una huella desde cero, teniendo en cuenta las dimensiones de nuestro componente.
- ✦ Modificar una huella ya existente para adaptarla a las necesidades impuestas por el diseño.

En este proyecto, se decidió modificar huellas ya existentes y de esa forma se pudieron generar según las especificaciones que iban apareciendo, de esta manera, se

tuvieron que editar las huellas para los transistores mosfet, para el transformador, la bobina, los condensadores, los diodos y los conectores, es decir, se tuvieron que modificar todas las huellas de los componentes para ajustarlas a las medidas reales.

Anteriormente se ha hablado de la “Netlist”, este archivo es el encargado de pasarle el diseño del circuito al “OrCad Layout”, por lo que, si en el otro programa se modifica algún componente o se añade otro, como ambos programas están unidos por este archivo, automáticamente se nos actualizará la placa para reordenarla con los nuevos cambios implementados. De esta manera, siempre que se quiera hacer algún cambio, no es necesario volver a realizar toda la disposición de los componentes.

La placa con la que se partía de referencia para hacer el diseño diseño era la siguiente:

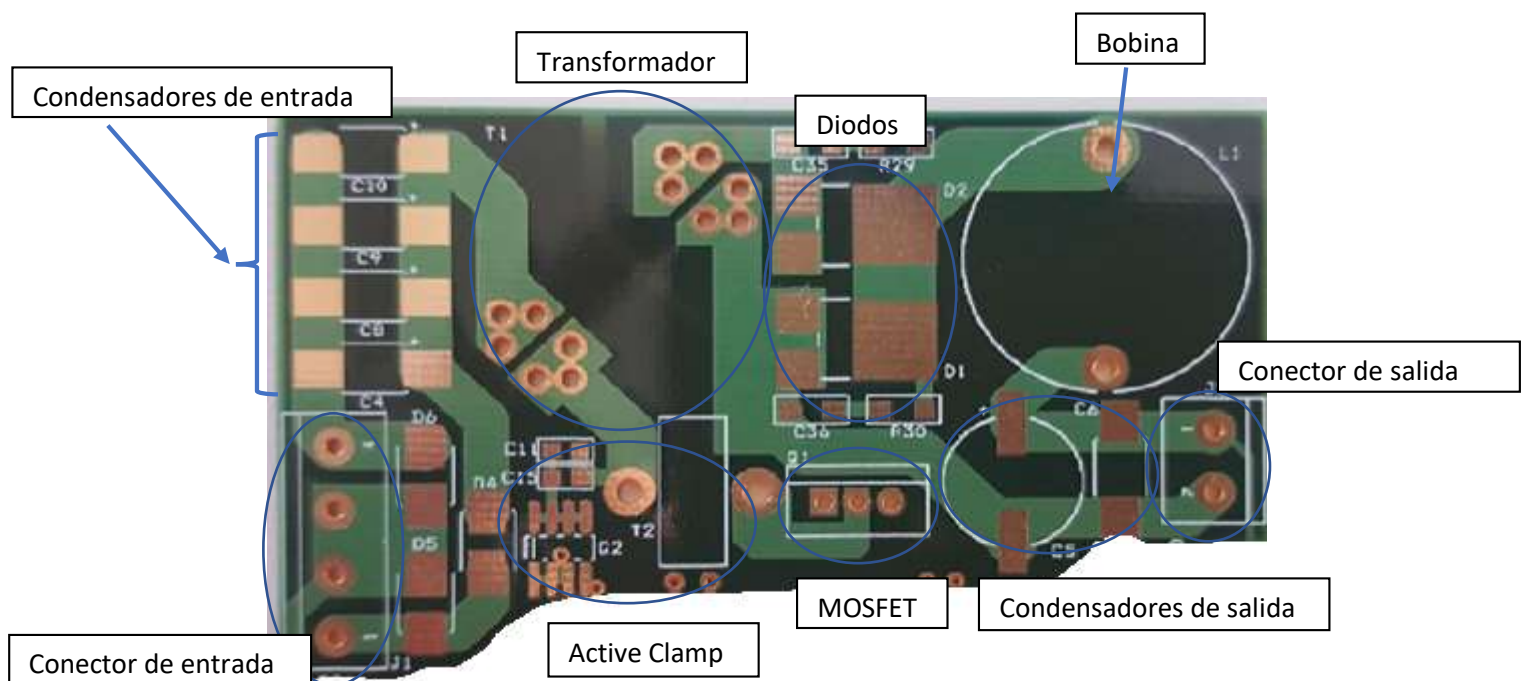


Figura 40: Huella del convertidor original

En este caso, al diseñar la placa las medidas de la placa son de 6.5 x4.3 cm, es decir, que tenía unos 27.95 cm^2 de superficie.

Al realizar el diseño de la placa, se ha conseguido reducir esa medida a 6.9x2.54 cm lo que equivale a unos 17.24 cm^2 .

La huella de la placa en el programa “OrCad Layout” ha quedado de la siguiente manera:

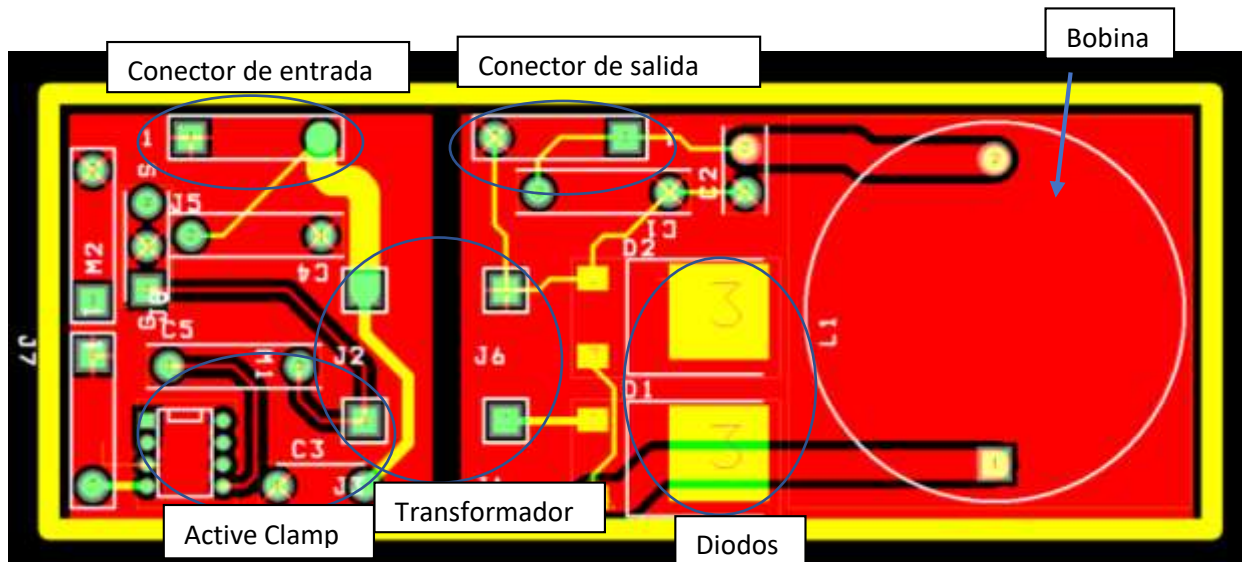


Figura 41: Huella del convertidor en el programa OrCad Layout

En esta imagen se pueden ver las distintas huellas de los componentes elegidos, así como su disposición dentro de la propia placa.

Una vez recibimos la placa construida, se procedió a taladrarla para así poder soldar los componentes a ella y de esta manera completar el proyecto.

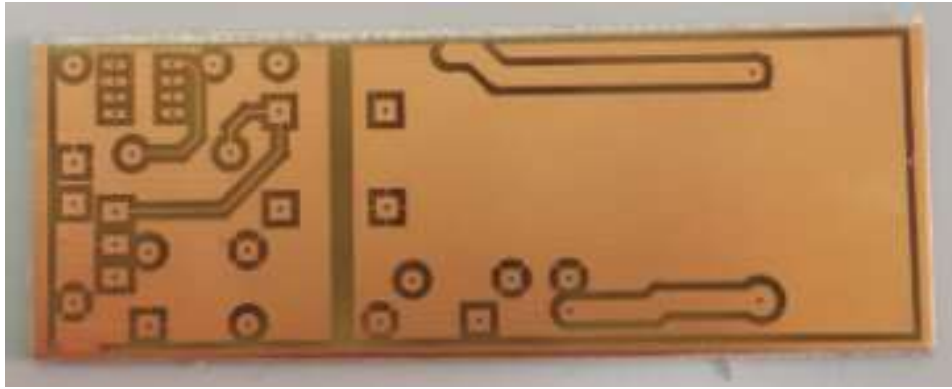


Figura 42: Placa PCB construida sin taladrar y sin componentes (capa BOT)

Tras realizar los taladros pertinentes, ya que algunos componentes son de montaje superficial y en esos casos no hay que hacer agujeros, la placa quedó de la siguiente manera, lista para soldar los componentes en ella:

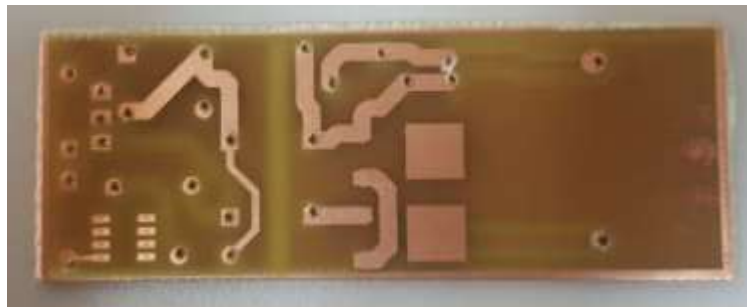


Figura 43: Placa PCB taladrada (capa TOP)

Una vez taladrada la placa PCB, se procedió al soldado de todos los componentes según estaban colocados previamente en la huella para así no confundirse a la hora de colocarlos.

Finalmente, los componentes quedaron colocados y soldados de la siguiente manera:



Figura 44: Montaje final convertidor (cara TOP)



Figura 45: Montaje final convertidor (cara BOT)

10. Conclusiones y trabajos futuros

El propósito de este proyecto, no era otro que diseñar un convertidor Forward más pequeño que el que ya se había realizado en su momento. Para ello se partió de unas especificaciones iniciales para así poder saber cómo debían de ser las del circuito a diseñar.

Con las especificaciones iniciales y los componentes del convertidor antiguo, se realizaron las simulaciones pertinentes con el programa “PSIM” y así de esta manera se pudo comprobar cómo se comportaban los componentes.

Una vez se obtuvieron dichas especificaciones, se tuvieron que diseñar todos los componentes y comprobar si los había mejores en el mercado, para así poder cumplir con esas condiciones.

Además de todo esto, nos servimos de dos programas muy potentes como son el “OrCad Capture CIS” y el “OrCad Layout” para realizar todo el diseño de la placa, con lo que eso conlleva: realización del esquema del circuito, colocación de todos los componentes de la mejor manera posible.....

Una vez se diseñó la placa PCB, hubo que taladrarla teniendo en cuenta que algunos componentes eran de montaje superficial y estos no habría que taladrarlos. Después del taladro, se procedió al soldado de los componentes.

Para realizar el taladro y el soldado de la placa nos tuvimos que servir de la huella del componente para así poder saber dónde iba colocado cada elemento.

Para concluir, se puede afirmar que se ha cumplido con el objetivo principal del proyecto, que era el de diseñar un convertidor más pequeño, como ya se había mencionado anteriormente. Y este objetivo se ha podido realizar en gran medida debido a la reducción de tamaño que hemos obtenido al rediseñar el transformador, que es el elemento donde hemos podido ganar más espacio en nuestra placa

Para posibles trabajos futuros quedarían por diseñar o programar los disparos de los transistores MOSFET entre otras acciones posibles.

11. Bibliografía

- [1] AENOR, Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e Instrucciones Técnicas, 2002.

- [2] «OGW uc3m,»
[Enlínea].Available:<http://ocw.uc3m.es/tecnologiaelectronica/electronica-de-potencia/material-de-clase-1/MC-F-005.pdf>. [Último acceso: Septiembre 2017].

- [3] <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/types-of-switching-dc-dc-converters>. [Último acceso: septiembre 2017]

- [4] Fernandez, C; Zumel,P; Valdivia,V; Fernandez-Herrero,A; Sanz,M; Lázaro,A; Barrado,A; “Identificaión y modelo comportamental de un sistema basado en pila de combustible de metanol”

- [5] <https://comohacer.eu/como-funcionan-las-pilas/>. [Último acceso: Agosto 2017]

- [6] [file:///C:/TFG/Baterias/SAAEI_PC3\[664\].pdf](file:///C:/TFG/Baterias/SAAEI_PC3[664].pdf). [Último acceso: Agosto 2017]

- [7]file:///C:/TFG/Baterias/Pilas%20de%20combustible_%20ventajas%20e%20inconvenientes_files/Pilas%20de%20combustible_%20ventajas%20e%20inconvenientes.html.
[Último acceso: Agosto 2017]

- [8] <https://kerchak.com/las-pilas-de-combustible/>. [Último acceso: Agosto 2017]

12. Anexos

12.1. Anexo I: Presupuesto

En esta tabla se reflejan los costes materiales del diseño de la placa, dependiendo la compañía en la que se podían pedir los componentes:

	Componente	Unidades	Precio	Ref.Farnell	Ref.RS	URL
1	Diodo, VS-50WQ06FN-M3, 5.5A, 60V, DPAK, 3-Pines	5	3,86 €		302-218	http://es.rs-online.com/web/p/diodos-schottky-v-rectificadores/0302218/
	Diodo, VS-50WQ06FN-M3, 5.5A, 60V, DPAK, 3-Pines	1	1,27	1463235		http://es.farnell.com/vishay/vs-50wq06fntr-m3/schottky-rectifier-simple-60v-to/dp/2646458
2	PCV-2-104-05L - Inductor, Potencia, Serie PCV-2, 100 µH, 5.6 A, 0.048 R, ± 10%	1	3,76	2457689		http://es.farnell.com/coilcraft/pcv-2-104-05l/inductor-potencia-100uh-5-6a-10/dp/2457689?ost=pcv-2-104-05l&searchView=table&isrfrnonsku=false&ddkey=http%3Aes-ES%2FElement14_Spain%2Fsearch
3	Condensador electrolítico de aluminio Panasonic EEUFC1H330, 33µF, ±20%, 50 V dc, Orificio Pasante, 600mΩ	1	0,33		315-0833	http://es.rs-online.com/web/p/condensadores-de-aluminio/3150833/
	EEUFC1H330 - Condensador Electrolítico, 33 µF, 50 V, Serie FC, ± 20%, Con Conexión Radial, 6.3 mm	1	0,39 €	9692401		http://es.farnell.com/panasonic-electronic-components/eeufc1h330/condensador-elec-alum-33uf-50v/dp/9692401?ost=9692401&searchView=table&isrfrnonsku=false&ddkey=http%3Aes-ES%2FElement14_Spain%2Fsearch
4	Condensador electrolítico de aluminio Panasonic EEUFC1H561S, 560µF, ±20%, 50 V dc, Orificio Pasante, 68mΩ	1	0,95 €		107-3178	http://es.rs-online.com/web/p/condensadores-de-aluminio/1073178/
	EEUFC1H561S - Condensador Electrolítico, 560 µF, 50 V, Serie FC, ± 20%, Con Conexión Radial, 18 mm	1	1,84	2326298		http://es.farnell.com/panasonic-electronic-components/eeufc1h561s/cond-elec-alum-560uf-50v-rad/dp/2326298?ost=2326298&searchView=table&isrfrnonsku=false&ddkey=http%3Aes-ES%2FElement14_Spain%2Fsearch
5	BFC241642004 - CAPACITOR POLYPROPYLENE PP FILM 0.2UF, 63V, 2%, RADIAL	1	5,16	1606082		http://es.farnell.com/vishay/bfc241642004/capacitor-polypropylene-pp-film/dp/1606082
	Condensador de polipropileno PP Panasonic, 200nF, ±5%, 630 V dc	25	27,75 €		807-6979	http://es.rs-online.com/web/p/condensadores-de-película-de-polipropileno/8076979/
6	IRF6216PBF - Transistor MOSFET, Canal P, 2.2 A, -150 V, 240 mohm, 10 V, 5 V	1	1,09	1298488		http://es.farnell.com/infineon/irf6216pbf/mosfet-p-ch-150-v-2-2a-so8/dp/1298488
	MOSFET, IRF6216PBF, P-Canal, 2,2 A, 150 V, 8-Pin, SOIC	5	5,18		650-3808	http://es.rs-online.com/web/p/transistores-mosfet/6503808/
7	FQP19N20 - Transistor MOSFET, Canal N, 19.4 A, 200 V, 0.12 ohm, 10 V, 5 V	1	1,25	9845500		http://es.farnell.com/fairchild-semiconductor/fqp19n20/mosfet-n-to-220/dp/9845500
	MOSFET, FQP19N20, N-Canal, 19 A, 200 V, 3-Pin, TO-220	10	10,36 €		903-4248	http://es.rs-online.com/web/p/transistores-mosfet/9034248/

Tabla 15: Presupuesto

El análisis del presupuesto de los componentes se realizó haciendo una comparación entre dos de las empresas más importantes de suministro de componentes electrónicos: Farnell y RS.

El resultado del total de los presupuestos por cada empresa fue el siguiente:

FARNELL	€	14,76
RS	€	48,43

Tabla 16: Coste material

Por lo que claramente, se decidió obtener los componentes a través de la empresa Farnell.

A esto habría que añadirle los costes personales por la elaboración de todo el proyecto:

Actividad	€/h	Nº de horas	Total
Diseño y elaboración de la PCB	20	200	4.000 €
Desarrollo de la memoria	15	60	900 €
Total			4.900 €

Tabla 17: Coste Personal

Finalmente, si unimos ambos gastos, el importe final quedaría de la siguiente manera:

Costes	Precio
Coste material	€ 14,76
Coste Personal	€ 4.900,00
Subcoste	€ 4.914,76
IVA (18%)	€ 884,66
TOTAL	€ 5.799,42

Tabla 18: Coste total